27e MILLE

GEORGES CLAUDE

L'ÉLECTRICITÉ
À LA PORTÉE
DE TOUT LE MONDE

LE RADIUM

H. DUNOD & E. PINAT ÉDITEURS

HARVARD MEDICAL
LIBRARY

RÖNTGEN

THE LLOYD E. HAWES
COLLECTION IN THE
HISTORY OF RADIOLOGY

Harvard Medical Library
in the Francis A. Countway
Library of Medicine ~ *Boston*

VERITATEM PER MEDICINAM QUÆRAMUS

L'ÉLECTRICITÉ

A LA PORTÉE

DE TOUT LE MONDE

L'ÉLECTRICITÉ

A LA PORTÉE

DE TOUT LE MONDE

PAR

Georges CLAUDE

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE DE PARIS

COURANT CONTINU, COURANTS VARIABLES
COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES ET POLYPHASÉS
LE RADIUM ET LES NOUVELLES RADIATIONS

PARIS (VIe)
Ve Ch. DUNOD, ÉDITEUR
49, Quai des Grands-Augustins, 49

1906

Digitized by the Internet Archive
in 2011 with funding from
Open Knowledge Commons and Harvard Medical School

http://www.archive.org/details/llectricitlaport00clau

NOTRE BUT

Qu'est-ce que l'électricité?

Si tous ceux auxquels la fée bienfaisante de notre époque a eu l'occasion de rendre service s'avisaient quelque jour de le demander à ceux qui le savent — ou qui croient le savoir — ce ne serait certes pas une petite opération que de les satisfaire!

Télégraphie et téléphonie, par le temps qui court, n'en sont plus à compter leurs adeptes. Éclairage et traction électriques n'en ont pas beaucoup moins. Et quant aux sonneries électriques, aux bobines de Ruhmkorff, quel collégien en rupture de *bancs* n'en a approfondi les mystères, n'a inquiété son entourage en utilisant de façon malicieuse leurs multiples ressources!

Qu'est-ce que cela, cependant, à côté de ce que nous réserve l'avenir? Le jour n'est-il pas proche où nos chevaux de fiacre auront définitivement *relayé;* où la vapeur, devenue trop paresseuse, aura disparu des locomotives de nos chemins de fer ; où, sous la poussée de l'électrochimie, les méthodes de la grande industrie chimique, si laborieusement édifiées, auront été submergées? Ne touchons-nous pas au moment où nous ne pourrons plus voir tourner une machine ou nous faire arracher une dent, labourer nos champs ou nous chauffer les pieds que par la grâce de l'électricité?

Ce jour-là, ce sera l'espèce humaine tout entière qui pourra se poser la question inscrite en tête de ces lignes :

— Qu'est-ce que l'électricité?

En attendant cet heureux temps, c'est, si vous le permettez, ce que nous allons essayer de tirer au clair pour notre compte.

Cependant, avant tout, il convient... d'éclairer notre lanterne.

Si nettement posée qu'elle soit en apparence, la question qui nous sert de point de départ est, en effet, susceptible de réponses bien distinctes suivant le point de vue auquel on se place. Le savant, dont la seule ambition est d'arracher à la Nature quelques-uns de ses secrets, ne l'envisage pas de la même façon que le fabricant de sonnettes électriques, qui veut avant tout tirer de l'électricité tout ce qu'elle peut rendre, commercialement parlant, qui veut placer dans son année le plus possible d'éléments de pile et de mètres de fils.

Que notre savant cherche le secret de l'électricité dans les frémissements des molécules de l'*éther;* que ses études lui montrent, chaque jour plus certaine, l'identité de la chaleur, de la lumière et de l'électricité ; qu'il tire de tous ces faits les déductions les plus profondes sur la constitution de l'univers, rien de mieux : c'est l'honneur de notre humanité que de tels hommes existent et mènent à bien des problèmes si ardus.

Pourtant, il faut le reconnaître, voilà qui *indiffère* joliment à notre marchand de sonnettes !

Ce qui le préoccupe, cet honorable industriel, ce que veulent en somme tous ceux qui, pour une raison ou pour une autre, ont affaire au côté pratique de l'électricité, ce n'est pas en apprendre la *nature*, ce n'est pas en connaître le *pourquoi*, c'est tout bonnement se rendre un compte suffisamment exact des *effets* qu'elle produit.

Et dame, il faut que les mathématiciens en fassent leur deuil, mais le calcul intégral ni la géométrie analytique n'ont rien à voir en cette histoire !

Satisfaire, dans la mesure de nos moyens, à ce désir fort légitime et fort modeste, tel est le but que nous nous efforcerons d'atteindre.

Et nous nous estimerons fort heureux si, après avoir eu le courage méritoire de suivre jusqu'au bout nos raisonnements terre à terre, le débutant peut se dire avec conviction en refermant son livre :

— Pas amusant, mais bonne besogne !

COURANT CONTINU

CHAPITRE PREMIER

PREMIÈRES CONSTATATIONS

PILES ÉLECTRIQUES. DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

En s'engageant dans le domaine de l'électricité, le débutant s'attend sans aucun doute à se trouver sur un terrain inconnu, d'une consistance toute spéciale, et sur lequel il ne tardera pas à se trouver dépaysé : on a réalisé tant de merveilles avec cette électricité, et chacune d'elles met en jeu des phénomènes si bizarres, si mystérieux, si éloignés de ceux que nous rencontrons dans la vie courante !

Disons-le-lui tout de suite, à ce timoré, ses craintes sont exagérées.

Assurément, j'aurais mauvaise grâce à nier que, parfois, des horizons inattendus s'ouvriront à ses yeux. L'électricité ne serait plus l'électricité s'il n'en était ainsi. Mais je tiens à lui affirmer que les points de repère ne lui feront pas défaut si souvent qu'il le pense : les phénomènes électriques ne sont pas aussi différents des autres qu'ils le paraissent à première vue ; il nous est possible de trouver dans certaines considérations tout à fait terre à terre, dans certains phénomènes tout à fait familiers à chacun des guides sûrs pour diriger nos premiers pas.

Nous ne manquerons pas de mettre à profit de si précieux auxiliaires.

C'est ainsi que, bien souvent, les phénomènes électriques présentent une grande *analogie* avec certains phénomènes hydrauliques, comme ceux qui accompagnent l'écoulement des liquides. Et comme il est plus facile de raisonner sur des phénomènes comme ceux-ci, parce qu'ils sont tangibles, aisés à représenter, et que d'ailleurs ils nous sont familiers, leur observation attentive peut faciliter grandement l'étude plus délicate de l'électricité.

Mais nous ne saurions trop insister sur ce point, qu'*analogie* ne signifie pas *identité*, et que, s'il existe entre les deux ordres de faits quelques ressemblances superficielles, suffisantes pour *faire voir*, cette analogie ne nous enseigne *rien* sur le mécanisme intime des phénomènes.

Cela, c'est la partie de la tâche que nous avons déclinée.

Ceci posé — et sans nous embarrasser d'un historique que le lecteur trouvera en détail dans le premier traité de physique venu — nous entrerons en matière.

L'électricité étant une science expérimentale par excellence, il nous faut avant tout nous procurer quelques instruments.

Pas de matériel compliqué, d'ailleurs.

Chaque fois que cela nous sera possible, nous nous souviendrons que l'illustre Scheele ne dédaignait pas — et pour cause — de faire collaborer à ses premières découvertes tuyaux de pipes et tessons de bouteilles, qu'il éprouvait un plaisir particulier à trouver, pour ses expériences les plus délicates, des ressources toujours nouvelles dans le matériel de sa... batterie de cuisine.

Nous inspirant de ce noble exemple sans prétendre lui faire, sur le terrain des découvertes, une concurrence qui serait malaisée, un vase de verre ou de faïence d'un litre environ, un vulgaire pot à confiture, sera, pour nos débuts, la pièce la plus compliquée de notre attirail.

Nous le remplirons aux 2/3 avec de l'eau à laquelle nous ajouterons un dixième environ d'acide sulfurique, ce liquide qui s'est taillé dans tant de figures humaines, sous le nom d'*huile de vitriol*, une si détestable réputation. C'est dire que, si nous tenons à notre... physique, la prudence est ici de

rigueur — mais non l'habit de cérémonie : pour éviter les projections de liquide dangereuses pour notre figure et mortelles pour nos vêtements, nous ajouterons l'acide dans l'eau en un *mince filet* et en agitant constamment.

Disons encore, avant d'aller plus loin, que, si votre épicier ne connaît pas l'huile de vitriol, du vinaigre très fort, employé seul, pourra à la rigueur la remplacer.

Notre petite cuisine terminée, plongeons dans le liquide (*fig.* 1) un système de deux lames métalliques rectangulaires, l'une en zinc, l'autre en cuivre, séparées par un morceau de drap et attachées ensemble avec de la ficelle. A chacune des lames, nous avons soudé un fil de cuivre ou de laiton; pour

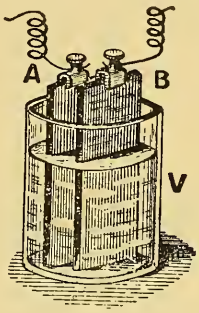


Fig. 1. — Piie électrique.

éviter de renverser notre vase lorsque, dans le feu des essais, nous tirerons sur les fils, nous avons tirebouchonné consciencieusement chacun de ces fils A, B, en l'enroulant sur un crayon : par la même occasion, notre appareil s'est trouvé doté d'un petit air scientifique, pas bien méchant à la vérité, mais néanmoins très flatteur pour notre amour-propre.

Attention surtout à ce que les deux fils, non plus que nos deux plaques, ne se touchent en aucun point...

Première constatation : nous voyons se former à la surface de la lame de zinc une foule de petites bulles de gaz qui bientôt viennent crever à la surface : c'est que le liquide exerce sur le zinc une *action chimique* énergique. Vous savez sans doute que l'eau est un composé, une combinaison de deux gaz, l'hydrogène et l'oxygène. Un chimiste vous dirait que le

zinc, sous l'influence de l'acide sulfurique, enlève à l'eau son oxygène et disparaît progressivement dans le liquide sous forme de sulfate de zinc, tandis que les petites bulles qui s'élèvent représentent le gaz laissé pour compte, l'hydrogène.

Mais renvoyons ce chimiste à ses cornues.

C'est à l'électricité que nous avons affaire, et vous allez voir que c'est suffisant.

Nos deux plaques métalliques, en effet, sont maintenant dans un état bien particulier et bien curieux.

Placez sur la langue, à quelques millimètres l'une de l'autre, les extrémités de nos deux fils en tire-bouchon : vous ne sentez rien ? Effectivement, notre système est un peu faible pour cette expérience, mais si nous l'avions remplacé par un système un peu plus fort, constitué par trois ou quatre paires de plaques immergées dans le liquide acide de vases différents et reliées entre elles par des fils de cuivre, comme l'in-

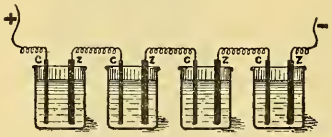


Fig. 2. — Assemblage de piles.

dique la figure 2, vous auriez senti immédiatement un *picotement bizarre*, qui vous aurait fait saliver, qui vous aurait fait aussi trembler le bout de la langue.

Ce n'est pas le métal des fils qui présente cette singulière saveur acide : la preuve, c'est qu'elle disparaît dès que vous enlevez *un seul* d'entre eux, pour reparaître dès que vous touchez de nouveau la langue avec le second fil ; la preuve encore, c'est que cette saveur disparaît aussi lorsque, conservant toujours les deux fils au contact de la langue, vous les faites en outre toucher l'un à l'autre.

C'est là, en effet, un *phénomène électrique*.

Passons à un autre exercice.

Reprenons notre système de deux plaques plongeant dans un vase unique, qui cette fois sera suffisant, et emportons-le dans une pièce obscure, dans une cave : nous allons appro-

cher, puis écarter l'un de l'autre nos deux fils, et, au moment de la séparation, vous pourrez voir jaillir au point de contact une *étincelle*. N'ayez crainte, d'ailleurs, d'être aveuglé! Il vous faut même y regarder à deux fois avant de distinguer quelque chose. Et savez-vous pourtant ce que c'est, cette chétive étincelle? C'est la foudre en miniature, c'est aussi l'arc électrique que vous admirez sur les boulevards de nos grandes villes; c'est, en un mot, *l'étincelle électrique!*

Maintenant, je vous demande un peu d'attention :

Notre chimiste nous a confié tout à l'heure que le liquide acide baignant nos deux plaques exerçait sur le zinc une *action chimique*.

Ne serait-ce pas justement cette action chimique qui provoque les phénomènes électriques que nous venons de constater? Oui sans doute, car si, à la place du liquide acide, j'avais pris de l'eau *pure*, ces effets singuliers ne se seraient pas produits.

Et pourtant, liquide corrosif et action chimique ne sont pas suffisants; la preuve, c'est que si nous plongeons dans un liquide même très fortement acide deux lames métalliques *identiques*, deux lames de zinc, ces deux lames sont énergiquement attaquées : cependant, plus la moindre action sur la langue, plus la moindre étincelle.

Cela ne vous dit-il rien?

Si, n'est-ce pas? Le liquide corrosif vous paraît nécessaire, mais la présence de deux lames métalliques *différentes* vous semble une condition non moins indispensable : vous êtes donc amené à conclure que c'était la *différence des actions chimiques* sur nos deux plaques de tout à l'heure (celle de cuivre était très peu attaquée) qui joue le grand rôle. C'est cela même, en effet, et c'est cette différence d'actions chimiques qui a mis les deux plaques dans des *états électriques* nécessairement *différents* eux aussi, puisque le contact d'un des fils avec notre langue n'a pas produit le même résultat que le contact simultané des deux.

Ceci posé, vous ne ferez aucune difficulté pour reconnaître que, sans sortir du domaine des faits, sans forger aucune hypothèse, nous pouvons affirmer qu'il s'est développé dans notre

système *quelque chose* de spécial. Ce quelque chose dont notre langue, dont nos yeux démontrent l'existence, nous avons aussi incontestablement le droit de lui donner un nom : nous l'appellerons, si vous n'y voyez pas d'inconvénients, une *différence de potentiel*.

Ce sera le premier terme de notre vocabulaire.

Pour l'enrichir dès à présent, ce pauvre vocabulaire, ajoutons que l'appareil bien simple qui nous a permis de faire ces importantes constatations est une *pile électrique ;* et pourquoi une *pile ?* Parce que le physicien italien Volta, qui construisit, en 1802, le premier de ces appareils, *empila* les uns sur les autres disques de cuivre et disques de zinc en les séparant deux par deux par des rondelles de drap imbibées d'acide sulfurique étendu. Il obtint ainsi une *pile* au sens absolu du mot, et ses successeurs, jugeant avec raison inutile d'aller chercher midi à quatorze heures, continuèrent d'appeler piles les appareils généralement quelconques dans lesquels l'*action chimique* est mise à profit pour produire l'électricité.

Quant aux deux plaques métalliques plongeant dans le liquide, nous les appellerons des *électrodes*.

Tout cela, évidemment, ne nous mène pas bien loin : aussi allons-nous nous hâter de voir à l'œuvre notre différence de potentiel.

COURANT ÉLECTRIQUE

Jusqu'ici, nous n'avons fait que constater : il s'agirait, maintenant, de comprendre.

Le moment est donc venu de faire un premier appel à ces comparaisons hydrauliques dont nous avons tout à l'heure vanté les mérites.

Nous allons supposer que deux vases contenant de l'eau, A et B, sont placés à des hauteurs différentes, A, par exemple, plus haut que B (*fig.* 3). Nous exprimerons cela en disant qu'entre A et B il existe une certaine *différence de niveau*.

Or, rappelez-vous que tout à l'heure nous avons désigné ce quelque chose de spécial créé par l'action chimique dans la pile

sous le nom de *différence de potentiel.* Différence de niveau, différence de potentiel : vous vous doutez bien que cette similitude de noms cache une ressemblance quelconque et que nous n'avons pas ainsi baptisé notre... quelque chose pour le plaisir de créer un nom baroque.

Effectivement, ce fameux quelque chose a comme effet de placer, au point de vue électrique, les deux électrodes de notre pile (*fig.* 4) dans les mêmes conditions relatives que nos deux vases A et B. En d'autres termes, les deux électrodes d'une pile en activité *ne sont pas au même niveau électrique* ou, comme disent les électriciens, au même *potentiel.* Cela revient

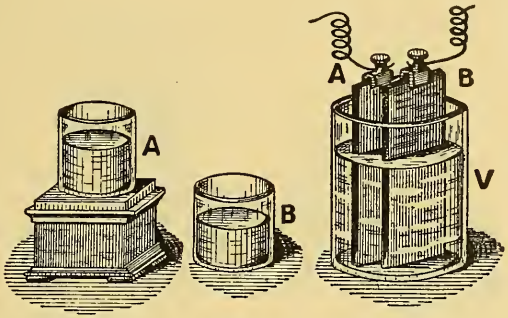


Fig. 3. Fig. 4.

Fig. 3. — Les deux vases A et B ne sont pas au même niveau hydraulique
Fig. 4. — Les deux électrodes A et B de la pile ne sont pas au même potentiel électrique.

à dire qu'il existe entre elles une certaine différence de niveau électrique, une certaine *différence de potentiel*, et vous voyez ainsi la genèse toute simple de cette expression que vous jugiez tout à l'heure passablement étrange.

Relions maintenant nos deux vases A et B par un tuyau ouvert T (*fig.* 5). Vous savez fort bien que la différence de niveau qui existe entre eux va provoquer un *courant liquide* qui ira du vase où le niveau est le plus élevé à celui où il est le plus bas.

Eh bien ! ce que nous venons de réaliser avec les liquides, nous pouvons le réaliser d'une façon analogue avec l'électricité.

Reprenons un des fils métalliques terminaux de la figure 4 : la pratique démontre — nous pouvions déjà le soupçonner

après nos expériences de tout à l'heure — que ce fil est à l'électricité ce qu'un tuyau est aux liquides, et on l'appelle pour cette raison un *conducteur électrique*[1]. Avec les deux bouts de ce conducteur, touchons les deux *pôles*, les deux électrodes de notre pile (*fig.* 6). Puisque, d'après ce que nous avons dit précédemment, ces deux pôles sont à un niveau, à un potentiel différent, un *courant électrique* va prendre naissance et circuler dans le fil.

Il est vrai que ce n'est pas tout de vous affirmer que ce courant électrique traverse le fil : il faut le prouver.

Essayons.

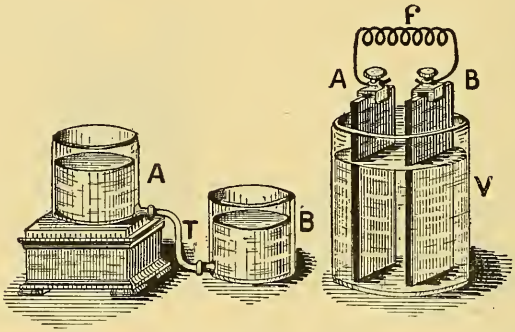


Fig. 5. Fig. 6.

Fig. 5. — Relions les deux vases A et B par un tuyau T : sous l'effet de la différence de niveau, un *courant liquide* se produit dans T.

Fig. 6. — Relions les deux électrodes A et B par un fil conducteur *f*. Sous l'effet de la différence de potentiel, un *courant électrique* se produit dans le fil.

Le courant liquide, lui, se laisse observer facilement : il suffit d'examiner attentivement le mouvement des particules solides en suspension dans le liquide à l'entrée et à la sortie du tuyau (*fig.* 5). Nous pourrions encore avoir la preuve de l'existence de ce courant en nous basant sur le frottement que le liquide exerce contre les parois, frottement qui se traduit comme toujours par un dégagement de chaleur — les jeunes

1. Si surprenante que paraisse cette pénétrabilité des métaux par l'électricité, c'est, en somme, un phénomène analogue à la propagation de la chaleur le long d'une barre métallique chauffée à l'une de ses extrémités. Il y a pourtant cette légère différence que la propagation de la chaleur est extrêmement lente, tandis que celle du courant électrique se fait à la vitesse respectable de quelque 300.000 kilomètres — 8 fois le tour de la terre — *par seconde!*

gymnastes qui se laissent glisser trop vite le long d'une corde lisse l'apprennent à leurs dépens. — Seulement, ici, le frottement est bien faible, et il nous faudrait un thermomètre bien sensible pour le constater.

Le courant électrique, au contraire de l'autre, ne se laisse pas voir volontiers, mais il produit dans les conducteurs qu'il traverse un « frottement » très énergique. Aussi, quand la source d'électricité est suffisante pour cela, le fil *s'échauffe-t-il* fortement. Le courant ne se gênerait même pas, si les conditions étaient favorables, pour *porter à l'incandescence*, pour *fondre* même notre conducteur : c'est justement cette propriété qui est mise à profit pour porter au blanc éblouissant le filament de charbon des lampes électriques à incandescence.

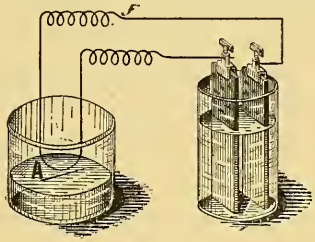


Fig. 7. — L'aiguille de la boussole est affolée par l'approche du fil qui joint les deux pôles d'une pile : preuve que ce fil est dans un état spécial.

Mais, par exemple, ne nous attendons pas à constater de pareils effets avec la pile trop faible que nous avons à notre disposition ; ne soyons même pas surpris si l'échauffement est tellement faible que nous ne puissions le constater !

Mais alors, et la preuve que vous réclamez !... Patience.

Pour vous la fournir, cette preuve, nous allons nous adresser à une propriété du courant électrique qui, celle-là, est sans analogie hydraulique évidente. Cette propriété, c'est l'action du courant électrique sur l'aiguille aimantée, action bien curieuse découverte par le Danois Œrsted en 1820.

Prenez une aiguille à coudre, aimantez-la en la frottant dans sa longueur avec un de ces petits aimants en fer à cheval que le moindre bazar vous procurera pour quelques sous. Manipulez-la ensuite quelques secondes entre vos doigts, puis — délicatement — laissez-la tomber à plat, d'une hauteur

d'un quart de centimètre, sur la surface tranquille de l'eau d'une cuvette (*fig.* 7).

Vous constatez du coup deux choses surprenantes :

D'abord, l'aiguille, au lieu de tomber au fond de la cuvette, *flotte à la surface* du liquide.

— Diable! les lois de la pesanteur ne seraient-elles qu'un vain mot?

— Nullement. Mais votre épiderme, si propre que vous vous flattiez de l'entretenir, s'est chargé de recouvrir l'aiguille d'une légère couche graisseuse qui l'a rendue insubmersible, à la faveur d'une singulière action capillaire.

En outre, vous remarquez que l'aiguille, après avoir tourné d'une certaine quantité, s'arrête définitivement dans une direction que vous constatez être assez exactement celle du sud au nord. — Mais c'est une *boussole* que nous venons de construire... — Sans doute... Et n'est-ce pas cette mystérieuse indication de l'aiguille aimantée, persistante et muette comme une obsession, qui a lancé vers la formidable nuit du Pôle tant d'audacieux explorateurs?

Trêve de dissertations!...

Notre boussole établie — un numéro sensationnel dans notre collection d'instruments économiques — approchons-en doucement le fil qui réunit les deux pôles de la pile (*fig.* 7).

Nouvelle surprise.

Que se passe-t-il donc? L'aiguille, soudainement déviée de son immuable direction, donne les signes d'une agitation manifeste, et, lorsque le fil est immobile, elle tend à se mettre *en croix* avec lui, sans plus se soucier de sa direction primitive que si le pôle nord avait été escamoté.

Ce n'est pas le fil lui-même qui trouble l'aiguille à ce point. Si, en effet, *sans l'éloigner de l'aiguille*, vous le détachez de l'un des pôles, l'aiguille, revenant à elle, reprend sa direction première. Dès que nous rattachons le fil, elle perd de nouveau la tête — c'est-à-dire le nord — et ainsi de suite. On conçoit combien tout cela doit amuser les marins de nos immenses bâtiments modernes, dont les boussoles sont entourées de toutes parts de fils transportant de puissants courants ; on se doute de toutes les précautions que cela exige. Mais, en

revanche, combien des merveilles que nous allons passer en revue n'ont d'autre origine que cette mystérieuse affinité de l'aimant et du courant électrique !

Ne nous perdons pas de nouveau en dissertations et revenons à nos moutons. Il n'y a évidemment pas de doute que le fil perturbateur, lorsqu'il établit la jonction entre les deux pôles de la pile, est le siège d'un phénomène anormal. Nous constatons cet état spécial par le trouble de la boussole à son voisinage ; nous l'avons déjà constaté, si notre pile y a mis un tant soit peu de bonne grâce, par son échauffement ; nous pourrions ajouter encore nombre d'autres indices que nous retrouverons plus tard.

Répétons-le, on admet que tout cela est dû à la circulation dans ce fil d'un courant électrique analogue à un écoulement liquide et engendré par la différence de niveau électrique, par la différence de potentiel qui existe entre les pôles de la source d'électricité.

Sens du courant électrique. — On ne se figure pas bien un courant qui n'aurait pas de *sens* — sans calembour. Quel est le sens du courant électrique ?

Dans le cas du courant liquide, nous savons, nous voyons parfaitement bien que l'écoulement a lieu du niveau le plus élevé vers le niveau le moins élevé (*fig.* 8). Pouvons-nous trouver quelque chose d'analogue en électricité ? C'est plus difficile, puisque ce courant, nous ne le voyons pas. Cherchons cependant.

Tout d'abord, l'indication que nous cherchons, ce n'est pas l'échauffement du conducteur qui peut nous la donner : que le courant circule dans un sens ou dans l'autre, il y aura toujours frottement, partant, échauffement.

L'action sur l'aiguille aimantée, elle, va nous fournir un renseignement.

Nous avons déjà vu que cette aiguille tendait à se mettre en croix avec le fil, siège du courant, d'autant plus que le fil est plus rapproché. Répétez l'expérience avec plus de soin en maintenant le fil tout près de l'aiguille et dans la direction nord-sud qu'elle indiquait tout d'abord. Détachez, puis

rattachez plusieurs fois le fil à l'un des pôles. Ah! voici une constance bien caractéristique : *toujours* la pointe de l'aiguille est déviée du même côté, par exemple vers votre droite (*fig.* 9).

Maintenant, sans déranger la partie du fil voisine de l'aiguille, nous allons intervertir les attaches, les *connexions* de ses extrémités avec les pôles : l'extrémité qui touchait au zinc de la pile, nous la mettons en contact avec le cuivre et inversement : résultat intéressant, l'aiguille est maintenant *déviée en sens contraire* de tout à l'heure, c'est-à-dire que la pointe vient vers votre gauche.

Évidemment, ces deux essais ne nous disent pas si le courant

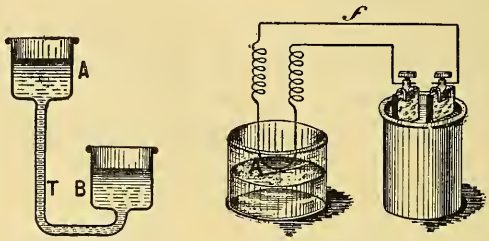


Fig. 8. Fig. 9.

Fig. 8. — Le courant liquide dans T est dirigé de A vers B.
Fig. 9. — L'aiguille aimantée est déviée d'un côté ou de l'autre, suivant les connexions du fil avec les pôles de la pile : cela montre que, suivant le cas, le courant électrique passe dans un sens ou dans l'autre.

circulait tout à l'heure dans le fil dans un sens DONNÉ, par exemple de droite à gauche, et s'il circule maintenant en sens contraire ; mais cela nous indique sans doute que tout au moins, d'une expérience à l'autre, le sens a *changé*.

Autrement dit, on ne connaît pas ce sens, mais *il semble bien qu'il en ait un*.

Voilà tout ce qu'on peut dire, à moins de prendre l'expérience pour plus bavarde qu'elle ne l'est.

Pourtant, *par convention*, et par analogie avec un courant liquide, lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur qui réunit deux points à des potentiels différents, comme les deux pôles d'une pile, on *admet* que le courant se dirige du point où le niveau électrique est le plus élevé au point où il est le plus bas.

Et, pour compléter ceci, on *admet* encore que, dans une pile, c'est le métal le moins attaqué qui est au potentiel le plus élevé, qui forme, comme on dit, le pôle *positif* (ou pôle +).

Dans notre pile, c'est donc la lame de cuivre qui est le pôle positif (ou pôle +), de sorte que dans le fil qui joint ces deux pôles, le courant se dirige du cuivre vers le zinc. Mais n'oublions pas que ce ne sont là que des conventions, et qu'en réalité nous ne savons rien !

Dans les croquis, on figure généralement une pile par deux traits parallèles, comme l'indique la figure 10 : le trait fin et long représente le pôle + ; quant au métal du pôle négatif ou pôle —, qui, étant attaqué par le liquide, *s'use* et doit donc être pris assez épais — c'est généralement du zinc —, on le représente pour cette raison par un gros trait.

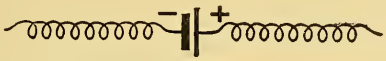


Fig. 10. — Représentation schématique d'une pile.

Autre question, maintenant.

Le courant liquide qui s'établit entre deux vases à des niveaux différents a une conséquence bien visible : il transporte à chaque instant une certaine *quantité de liquide* du vase le plus élevé au vase le moins élevé.

Et notre courant électrique, lui, qu'est-ce qu'il transporte?

Voilà une question embarrassante. Pourtant, puisque nous nous figurons le courant électrique avec toutes les apparences d'un courant liquide, ne nous arrêtons pas pour si peu et, pour l'instant du moins, envisageons ce courant comme ayant pour effet de transporter d'un pôle à l'autre, à chaque instant, une certaine *quantité d'électricité*. Quantité d'électricité et quantité de liquide seront ainsi pour nous des grandeurs analogues au même titre que différence de niveau et différence de potentiel.

Résumons maintenant nos connaissances. Ce ne sera pas long, hélas !

RÉSUMÉ

La présence dans un liquide d'un système de deux lames métalliques séparées l'une de l'autre et inégalement attaquées par ce liquide, constitue une *pile électrique*. L'action chimique dont les piles sont le siège donne naissance à des *phénomènes électriques* faciles à constater lorsque nous relions par des fils métalliques chacune des *électrodes* de la pile avec notre langue (effets physiologiques), ou encore lorsque nous choquons dans l'obscurité l'extrémité de ces fils, ce qui produit à chaque rupture de contact une *étincelle électrique* (effets lumineux). Ces effets sont dus à une *différence de potentiel*, analogue à la différence de niveau hydraulique, et en vertu de laquelle les deux électrodes ou *pôles* de la pile sont à des *niveaux électriques différents*.

Par suite de cette différence de potentiel, un *courant électrique*, supposé analogue à un courant liquide, parcourt le fil *conducteur* avec lequel nous relions les deux pôles, ce fil conducteur jouant pour l'électricité le rôle d'un tuyau par rapport aux liquides. Le courant ainsi produit est décelé tant par l'*échauffement* du conducteur, pouvant aller jusqu'à l'incandescence et à la fusion (effets calorifiques, lampes à incandescence à filament de charbon), que par l'*action perturbatrice* exercée sur l'aiguille aimantée (effets électro-magnétiques). *Par convention*, on admet que ce courant circule dans le fil de l'électrode la moins attaquée, qu'on *suppose* être au potentiel le plus élevé (pôle positif ou +), vers l'électrode la plus attaquée, qu'on *suppose* être au potentiel le plus bas (pôle négatif ou —). Ainsi, dans une pile zinc-cuivre-acide sulfurique, c'est le cuivre qui constitue le pôle positif.

Nous pouvons nous représenter ce courant électrique comme ayant pour effet de transporter à chaque instant du pôle positif vers le pôle négatif une certaine *quantité d'électricité* analogue à une quantité de liquide.

CHAPITRE DEUXIÈME

LA MESURE DANS LES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

Nous avons constaté tout à l'heure quelques phénomènes ; j'ai pu, je l'espère du moins, vous en faire saisir le mécanisme. Mais l'électricité ne serait pas une science qui se respecte si elle se bornait là, si elle n'était pas capable d'introduire la *mesure* dans l'étude de ces phénomènes. C'est donc de mesure que nous allons nous occuper maintenant et, faut-il vous l'avouer, cela n'est pas très amusant.

Revenons à nos deux vases communiquants A et B (*fig.* 11).

Il est bien évident que le courant circulant dans le tuyau de jonction T *dépend de la différence de niveau* qui existe entre A et B. Selon que ces deux vases sont placés à des niveaux plus ou moins différents, le courant liquide dans T *est plus ou moins grand :* ainsi, à chaque valeur de la différence de niveau correspond une certaine valeur du courant produit, de sorte qu'on serait fort embarrassé, dans l'étude de l'écoulement des liquides, si l'on ne savait *mesurer* une différence de niveau.

Au même titre que la différence de niveau hydraulique, la différence de potentiel électrique d'une pile est évidemment une *grandeur* susceptible de *valeurs* plus ou moins grandes, et ces valeurs doivent influer sur l'importance des effets électriques produits par cette pile. Dès lors que la différence de potentiel — que la *diff. de pot.*, écrirons-nous à l'avenir pour simplifier — est susceptible d'affecter des valeurs différentes, il est nécessaire aussi de savoir la mesurer.

Ici, une observation.

Vous seriez certainement bien embarrassé pour apprécier la valeur des objets si vous n'aviez pas d'unité de monnaie. Vous ne le seriez pas moins pour mesurer une longueur si vous n'aviez pas de mètre, c'est-à-dire d'unité de longueur. Également nous ne pourrons non plus mesurer une diff. de pot. si nous n'avons d'abord fait choix d'une *unité de diff. de pot.*. Or, vous savez que l'unité de longueur, le mètre, a été obtenue en choisissant une longueur convenable, facile à manier, d'une dimension voisine de celle des objets usuels; vous savez que pour l'unité de valeur, le franc, on a choisi

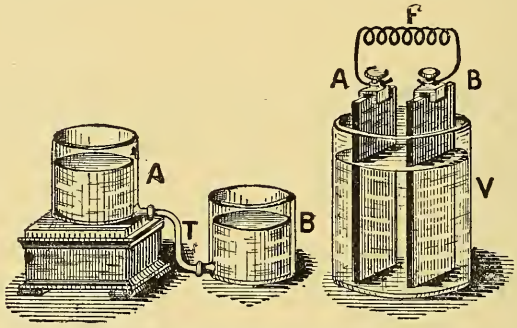


Fig. 11. — La valeur du courant liquide dans T dépend de la différence de niveau entre A et B.

Fig. 12. — La valeur du courant électrique dans *f* dépend de la différence de potentiel entre les électrodes.

une valeur comparable à celle des objets usuels, au prix de la journée d'un ouvrier; de même, on a pris pour *unité de diff. de pot.* une différence de potentiel voisine de celles que développent les sources d'électricité les plus répandues, les piles électriques.

Cette unité, on l'a appelée le **volt**, du nom de Volta, le célèbre professeur italien que son empilement de petites rondelles devait conduire à l'immortalité.

Ainsi, de même qu'une différence de niveau se mesure et s'exprime en mètres, une différence de potentiel se mesure et s'exprime en volts.

Pour mesurer une différence de potentiel, nous chercherons donc, à l'aide d'instruments que nous étudierons plus tard sous le nom de *voltmètres*, combien cette différence de poten-

tiel contient l'unité, ce que nous exprimerons, la mesure une fois faite, en disant que cette diff. de pot. est de *tant de volts*.

Il est une différence de potentiel qui mérite une mention particulière.

Lorsque nos deux éternels vases A et B étaient reliés par le fatidique tuyau T (*fig.* 13), le courant qui circulait dans celui-ci avait pour conséquence évidente de faire *diminuer* la différence de niveau entre ces deux vases. Pour une raison analogue et que nous tâcherons d'expliquer plus clairement un peu plus tard, on conçoit également que la différence de potentiel entre les deux pôles d'une pile est toujours *plus petite*, si ces pôles sont reliés par un conducteur que si la pile ne débite

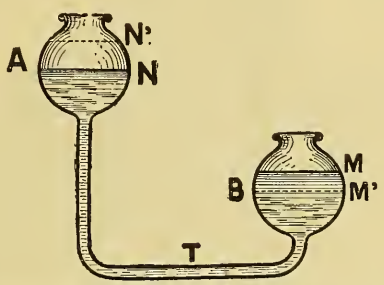


Fig. 13. — Le débit de A à B a pour effet de faire tomber la différence de niveau de N'M' à NM.

pas. Dans ce dernier cas, la différence de potentiel entre les pôles de la pile, la *différence de potentiel aux bornes*, comme on dit en « argot » d'électricien, est donc plus grande que dans tous les autres.

Aussi, tout en continuant à la mesurer en volts, donne-t-on à cette différence de potentiel d'une pile qui ne débite pas un nom spécial : on l'appelle *force électromotrice* (en abrégé, f. é. m.), nom parfaitement justifié, puisque c'est cette force électromotrice qui est la *cause* du courant lorsqu'on réunit les deux pôles par un conducteur. Et si, malgré cela, vous ne voyez dans ce nom nouveau d'une chose déjà connue que prétexte à vous ennuyer, je vous dirai que, tandis que la différence de potentiel aux bornes d'une pile qui débite peut affecter toutes les valeurs comprises entre zéro et ladite force électromotrice, cette force électromotrice, au contraire pré-

sente l'intéressante particularité d'être, épuisement du liquide à part, absolument *fixe* et immuable pour un type de piles déterminé.

Ainsi, toutes les piles d'un même système, quelle que soit leur forme, quelle que soit leur grandeur, ont même force électromotrice si les substances qui les constituent sont les mêmes; par exemple, la f. é. m. des piles Leclanché est de 1,5 volt, celle des piles-bouteilles au bichromate, 2 volts.

Quant à la copie de la pile Volta qui nous a servi jusqu'ici

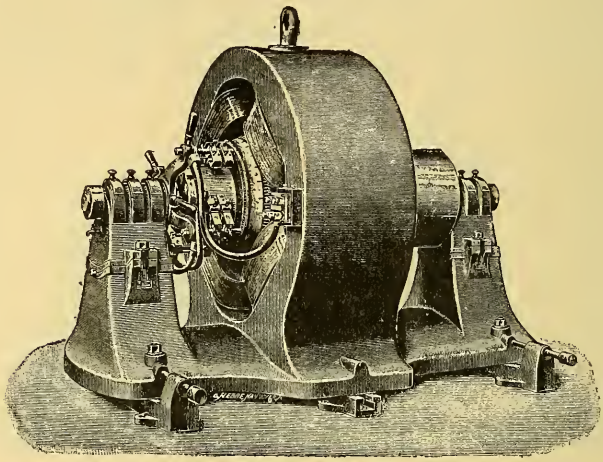


Fig. 14. — Dynamo donnant 120 volts.

pour nos expériences, elle ne donne pas, elle, beaucoup plus d'un demi-volt.

Disons d'ailleurs que, d'une manière générale, la f. é. m. des différents systèmes de piles usuelles varie de un peu moins de 1 volt à un peu plus de 2. Ce n'est donc pas très étendu comme échelle.

En revanche, à côté des piles, il est d'autres sources d'électricité, qui donnent d'ailleurs naissance, à la grandeur près, aux mêmes phénomènes que nous avons étudiés dans le cas de la pile, mais dans lesquelles les f. é. m. sont bien différentes. Ces appareils, dont nous aurons l'occasion de revoir quelques-uns en détail, sont d'abord les *piles thermo-électriques*, dans lesquelles ce n'est plus l'action chimique, mais l'action

calorifique qui produit l'électricité. Là, les f. é. m. développées sont si petites que c'est en *millivolts*, millièmes de volts, et même en *microvolts*, millionièmes de volts, qu'il faut compter.

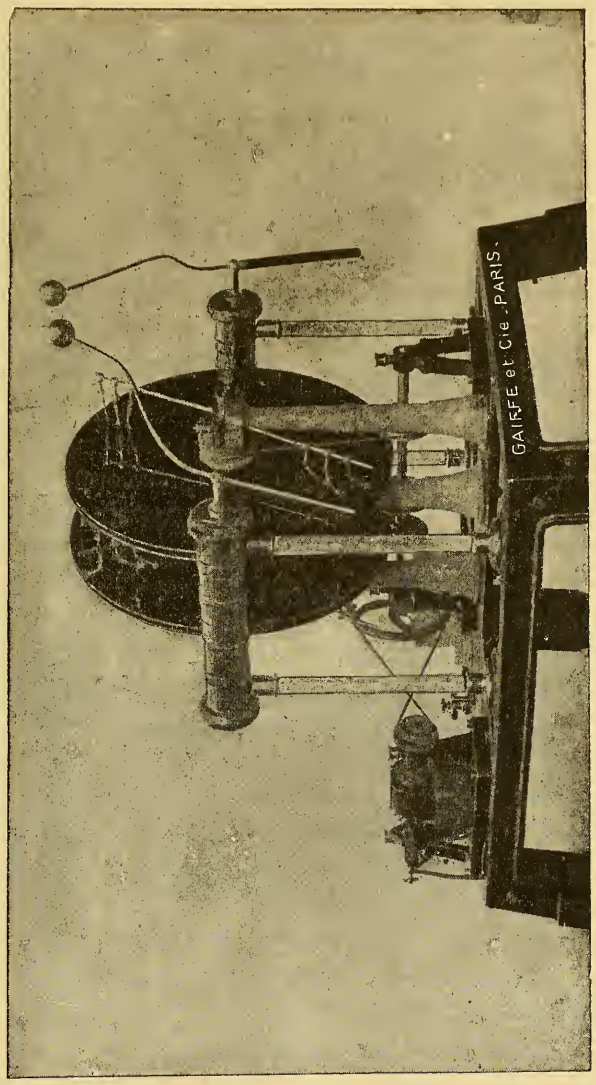


Fig. 5. — Machine statique conduite par un moteur électrique et donnant des dizaines de mille volts.

Ce sont ensuite les machines *dynamos* (*fig.* 14), dans lesquelles l'énergie mécanique est mise à profit, et qui donnent, suivant leur construction, depuis quelques volts jusqu'à plusieurs milliers de volts.

Ce sont enfin les machines *statiques*, vieilles machines à frottement dont s'amusaient nos pères, ou machines *à influence*, plus modernes (*fig.* 15), et qui fournissent les volts, elles, par dizaines de mille.

Ouf!... dites-vous? Soupir de soulagement un peu prématuré!

C'est en effet, après la différence de potentiel, au tour du courant électrique à réclamer notre sollicitude.

Vous avez déjà admis (p. 19) — peut-être ne vous en souvenez-vous plus — que ce courant électrique est caractérisé par le transport d'un pôle à l'autre de quelque chose, nous ne savons pas au juste quoi, mais que nous nous figurons volontiers être analogue à un liquide.

Cette *quantité d'électricité*, comme nous l'avons appelée par analogie, qui traverse un conducteur en un certain temps, disons tout de suite que, si on ne sait pas ce que c'est, on sait du moins fort bien la mesurer, ce qui est toujours une consolation :

Il suffit d'interposer sur le passage du courant une dissolution d'un sel métallique, sulfate de cuivre, par exemple, que le courant, en se jouant, va décomposer, et de peser, au bout de ce temps, la quantité de métal *mise en liberté* par le courant. Le poids de ce métal, en effet, dépend de la quantité d'électricité qui a traversé la dissolution, *et de cela seulement ;* nous verrons plus tard à le comprendre (p. 132).

On a choisi comme *unité de quantité*, pour des raisons que je n'indiquerai pas ici, la quantité d'électricité qui dépose 0,327 milligramme de cuivre ou 1,118 milligramme d'argent. Cette unité a été baptisée **coulomb,** du nom d'un physicien français mort au commencement de ce siècle.

Mais cette quantité d'électricité, ce coulomb, a pu traverser notre *voltamètre à cuivre* ou dans un temps très court, ou dans un temps très long, suivant que le courant était plus ou moins *intense*.

L'*intensité* d'un courant, voici donc une nouvelle grandeur qui intervient, et nous ne pouvons pas faire moins que de lui donner, à elle aussi, son unité. Si le courant est capable de déposer beaucoup de métal en peu de temps, autrement dit s'il transporte beaucoup de coulombs en un temps très court,

il est très intense, et réciproquement. L'intensité se mesure donc au nombre de coulombs transportés d'un pôle à l'autre dans l'unité de temps, et le courant que nous prendrons comme terme de comparaison, comme unité, sera, par suite, celui qui transporte *un coulomb par seconde.*

L'intensité est une grandeur qui intervient à chaque pas en électricité, et le nom de *coulomb par seconde* serait trop long à répéter constamment : aussi a-t-on préféré donner un nom spécial à cette unité, et le *coulomb par seconde* s'appelle tout simplement l'**ampère.**

Saluons ! La science française est bien représentée, comme on voit, dans cette nomenclature établie par l'entente commune des savants de tous les pays.

Des intéressantes (?) considérations qui précèdent, on peut conclure que pour mesurer l'intensité d'un courant, il suffira de constater, par la quantité de métal déposée dans un voltamètre, combien il passe de coulombs pendant un nombre donné de secondes. On divisera alors le premier nombre par le second et on aura ainsi l'intensité en ampères. Si, par exemple, il passe 3.000 coulombs en 10 minutes ou 600 secondes, le courant sera de $\frac{3.000}{600} = 5$ ampères. Représentons ceci par une formule générale : Appelons I l'intensité en ampères du courant qui transporte Q coulombs en T secondes, on aura $I = \frac{Q}{T}$.

Par exemple, un courant qui transporte d'un pôle à l'autre 25 coulombs en 5 secondes est un courant de $I = \frac{Q}{T} = \frac{25}{5} = 5$ coulombs par seconde ou 5 ampères.

Ajoutons que le moyen de mesure que nous venons d'indiquer n'est presque jamais employé industriellement. Dans la pratique, on ne s'amuse pas à compter des coulombs ; on va beaucoup plus vite que cela en intercalant sur le passage du courant un *ampèremètre*, instrument qui indique directement l'intensité, ainsi que nous aurons l'occasion de l'expliquer, comme le *voltmètre* (ne pas confondre avec *voltamètre*) indique directement les diff. de pot.. (Voir p. 22).

Autre remarque, avant de terminer, et qui prouvera combien j'avais raison au début d'insister sur ce point que phénomènes électriques et hydrauliques n'offrent pas une identité absolue, mais de simples analogies superficielles :

Pourquoi le courant qui traverse le tuyau de jonction des deux vases A et B devient-il plus intense lorsque la différence de niveau augmente? Parce que, me répondez-vous, la *rapidité* du courant augmente et qu'il passe ainsi plus de liquide dans l'unité de temps.

Effectivement.

Mais, dans le cas du courant électrique, il n'en est plus ainsi, bien que l'intensité augmente également avec la différence de potentiel : on a fait des expériences précises à ce sujet, et on a constaté que la vitesse du courant électrique est sensiblement indépendante de la grandeur de la différence de potentiel agissante : la *pression électrique* qui agit aux extrémités d'un conducteur peut être réduite de 1.000 volts, par exemple, à 10 volts, à 1 volt même, le courant n'en continue pas moins son petit bonhomme de chemin... à une allure voisine de 300.000 kilomètres par seconde !

C'est que le courant électrique n'est pas ce qu'un vain peuple pense ; c'est que notre image de l'écoulement liquide n'est qu'une fiction grossière, bien éloignée de la réalité ; c'est qu'il s'en faut que le courant soit condensé, étouffé dans l'étroite conduite où nous avons la prétention de l'avoir emprisonné !

Rappelez-vous l'aiguille aimantée, sur laquelle il agit à distance...

Nous touchons à de graves questions ; aussi, restons-en là... pour le moment !

RÉSUMÉ

Les grandeurs électriques, comme les autres, sont susceptibles d'affecter des valeurs différentes et doivent dès lors être *mesurées*. Pour cela, il faut d'abord, pour chaque sorte de grandeur, choisir une *unité*. Pour la diff. de pot., cette unité est le *volt*. On appelle force électromotrice (f. é. m.) la diff. de pot. aux bornes d'une source d'électricité qui ne débite pas. Cette f. é. m., qui s'exprime également en

volts, est fixe pour un type de pile donné et ne dépend ni de la forme, ni de la grandeur de celle-ci. Les f. é. m. des différentes sources d'électricité sont très variables suivant la nature de ces sources.

La quantité d'électricité transportée d'un pôle à l'autre par un courant se mesure en *coulombs*, le coulomb étant la quantité capable de déposer dans un *voltamètre* convenable 0,327 milligramme de cuivre.

Suivant qu'une quantité donnée d'électricité est transportée par un courant en un temps plus ou moins court, ce courant est plus ou moins *intense*. On mesure donc son intensité par le nombre de *coulombs par seconde* qu'il peut transporter. Le coulomb par seconde s'appelle l'*ampère*.

La vitesse du courant électrique, contrairement à celle du courant hydraulique, ne dépend pas de la diff. de pot. qui le détermine. Ceci provient de ce que courant électrique et courant hydraulique sont, au fond, des choses bien différentes.

CHAPITRE TROISIÈME[1]

CONSIDÉRATIONS SUR LES PILES USUELLES

DÉPOLARISATION

La pile électrique que vous manipulez depuis le commencement de ces lignes n'a pas la prétention — heureusement pour elle — d'être une pile industrielle. Hâtons-nous de le dire pour détruire les illusions que vous pourriez nourrir à son sujet. C'est même un fort mauvais instrument, qui n'a pour lui que sa simplicité. Si vous essayiez de l'appliquer à un usage pratique, de lui faire produire un courant un peu intense, vous ne tarderiez pas à en avoir la meilleure preuve en constatant que ce courant, après quelques instants de bonne volonté, s'affaiblit rapidement jusqu'à extinction complète.

Pourquoi cette faillite lamentable après cet heureux début ? Il y a là un phénomène assez curieux à étudier.

Nous avons remarqué, dès nos premiers pas en électricité, qu'une des conséquences des actions chimiques qui s'exercent dans la pile est un dégagement d'hydrogène sous forme de bulles gazeuses sur le zinc, si la pile *ne débite pas*. En y regardant de plus près, nous pourrions voir que, lorsque la pile *débite*, c'est sur le cuivre que l'hydrogène vient se dégager. Or, dans ce dernier cas, les bulles ont tôt fait de recouvrir l'électrode positive d'une couche, d'une *gaine gazeuse* de plus en plus épaisse. Cette gaine, espèce de vernis non conducteur enveloppant l'électrode, oppose à la production des effets électriques un obstacle très grand que nous nous expliquerons aisément lorsque le niveau de nos connaissances se sera exhaussé jusqu'à la conception de la *résistance intérieure* d'une pile.

C'en est assez, toutefois, que vous soyez au courant de ces faits pour que votre perspicacité, mise en éveil, trouve immédiatement le

---

1. Les chapitres consacrés aux applications sont imprimés en caractères plus fins que les chapitres théoriques, comme nécessitant une moindre attention.

remède au mal dont souffre notre instrument : puisque la gaine gazeuse est la coupable, il suffira, dites-vous, de faire en sorte qu'elle ne puisse plus se former. Ceci est parfaitement exact. Ce n'est toutefois que poser le problème, et sans doute n'est-il pas si facile à résoudre, car nos éminents électriciens y sont attelés depuis la création de la pile : ils l'énoncent, dans leur argot spécial, en disant qu'il faut empêcher la pile de se *polariser*.

Les résultats de ces efforts, il faut l'avouer, n'ont pas été inutiles.

On sait très bien maintenant empêcher une pile de se polariser.

On n'a même que l'embarras du choix parmi les méthodes proposées.

Le procédé le plus naturel consiste à enlever mécaniquement les bulles, à mesure de leur formation, soit par l'agitation continue, soit par insufflation perpétuelle d'un courant d'air au sein du liquide. On comprendra aisément que, si ce moyen est le plus naturel, il n'est pas en tout cas le plus pratique : si « souffler n'est pas jouer », cela n'a pas réussi non plus comme distraction à l'usage des électriciens ; et ni les piles à agitation, ni celles à insufflation n'ont prodigué à leurs auteurs les satisfaction morales et financières que les inventeurs — êtres incorrigibles — ne manquent jamais de se décerner dans leurs rêves.

On peut encore, dans une certaine mesure, empêcher la formation de la gaine par la circulation des liquides, d'où des piles dites à *écoulement*, très en faveur auprès des amateurs d'éclairage et que nous retrouverons un peu plus loin.

Un autre procédé de dépolarisation est beaucoup plus pratique, beaucoup plus fréquemment employé. Il consiste à *manger* l'hydrogène au fur et à mesure de sa formation, en utilisant pour cela les facultés digestives de certains produits chimiques. L'hydrogène, nous l'avons expliqué, se produit par la décomposition, au contact du zinc, de l'eau du liquide, dont l'oxygène est absorbé. Abandonné par l'oxygène, l'hydrogène se rend, à travers le liquide, vers le pôle positif, sur lequel il formera, si nous n'y prenons garde, son dépôt pernicieux. Mais plaçons sur le trajet de l'une à l'autre électrode, trajet que forcément il doit parcourir, une substance très riche en oxygène, très *oxydante*, telle que le bichromate de potasse ou l'acide azotique. Les choses changent alors d'aspect, car la substance oxydante octroie d'office à l'hydrogène une partie de son oxygène, qui le transforme en eau. Nous élevons de cette façon une barrière insurmontable aux velléités perturbatrices de l'hydrogène, la formation de la gaine est rendue impossible, et nous réalisons ainsi une pile *impolarisable*.

Comme tant d'autres choses, c'est à un Français, Becquerel, qu'est due cette voie féconde de la dépolarisation chimique.

Il y a différentes manières d'appliquer ce principe. On se contente souvent d'ajouter la substance dépolarisante, le dépolarisant,

à même le liquide acide. C'est ainsi que les piles à treuil de Trouvé (*fig.* 16), les piles-bouteilles de Grenet (*fig.* 17), toutes munies d'un dispositif qui permet de relever les zincs quand on a terminé l'expérience, contiennent tout simplement comme liquide excitateur une solution au 1/10 en volume d'acide sulfurique, à laquelle on a ajouté, à titre de dépolarisant, 150 grammes par litre de bichromate de potasse ou de soude[1].

Les électrodes positives de ces piles sont constituées par du charbon de cornue, et la force électromotrice initiale est de 2 volts.

La méthode que nous venons d'indiquer et qui consiste à mélanger simplement le dépolarisant au liquide excitateur constitue toutefois une mauvaise manière d'opérer. Cela est aisé à comprendre. Il est

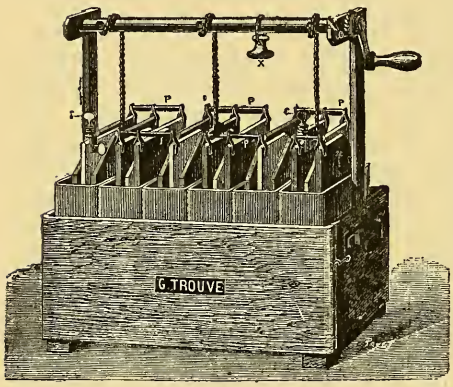


Fig. 16. — Pile à treuil de Trouvé.

Fig. 17. — Pile-bouteille de Grenet.

toujours impossible d'utiliser jusqu'au bout le liquide excitateur d'une pile à cause de l'affaiblissement graduel qui se produit lorsqu'une partie notable de l'acide a disparu. On est alors forcé de jeter le liquide excitateur. Si l'acide est seul, ceci n'est pas un grand inconvénient, l'acide sulfurique étant très bon marché. Si, au contraire, le dépolarisant y est mélangé, force est de le jeter en même temps, et c'est plus ennuyeux, car celui-ci est toujours un produit assez coûteux.

De la conception bien nette de cet inconvénient, une idée heureuse est résultée, qui a fait depuis son chemin.

---

1. Ce dernier est plus économique et préférable.

PILES A DEUX LIQUIDES

On a constaté qu'il était possible de ne pas mélanger le dépolarisant au liquide acide, mais de le concentrer exclusivement là où sa présence est nécessaire, c'est-à-dire autour de l'électrode positive, en l'enfermant, ainsi que cette électrode, dans un *vase poreux* en terre cuite. Ce vase, que l'on remplace quelquefois par un diaphragme de parchemin végétal, s'oppose en effet au mélange rapide des deux liquides, sans toutefois empêcher le cheminement de l'hydrogène vers le pôle positif.

On peut alors jeter le liquide acide excitateur, placé avec l'électrode négative dans le vase extérieur, sans pour cela perdre le liquide dépolarisant si celui-ci est encore utilisable[1].

Cette disposition n'est pas absolue, et, pour réduire au minimum la dépense de zinc et les manipulations des piles à débit moyen, M. Radiguet préfère mettre électrode attaquable et liquide acide dans le vase poreux, dépolarisant et charbon à l'extérieur. Le mécanisme n'est pas changé pour si peu.

Telles sont les piles dites *à deux liquides:* liquide excitateur d'une part, liquide dépolarisant de l'autre.

Un avantage important de ces piles à deux liquides résulte du fait que le dépolarisant, au lieu d'être disséminé dans toute une masse liquide où il n'a que faire (cas des piles à dépolarisant à un seul liquide), est concentré là où son action est utile : il agit alors plus efficacement, la pile peut rester *constante* pendant un temps assez long, au lieu de présenter ce *coup de fouet* du début dont les piles à dépolarisant et à un seul liquide sont coutumières.

Influence de la nature des électrodes. — Dans la plupart des piles usuelles employées aujourd'hui, dont nous passerons quelques types en revue tout à l'heure, l'électrode positive est constituée par une ou plusieurs plaques de *charbon*. De l'électrode de cuivre de Volta il n'est plus question.

Cette préférence se justifie aisément.

Nous avons expliqué (p. 11) que, dans une pile, la différence entre les potentiels des deux pôles est provoquée par la *différence*, par l'inégalité des actions chimiques sur les deux électrodes. Donc, plus grande sera cette différence d'action, plus grand aussi sera ce que

1. Ce qui n'empêche que dans la pile Bunsen, d'après M. d'Arsonval, on n'utilise guère plus de 150 grammes par kilogramme du dépolarisant employé (acide azotique).

nous avons appelé la force électromotrice de la pile. Vous comprenez dès lors très bien que non seulement l'action chimique qui tend à s'exercer sur l'électrode positive n'est pas utile, mais qu'elle est *nuisible*, puisqu'elle diminue l'écart entre les actions chimiques et, par suite, la force électromotrice.

Il résulte de ce fait qu'on doit choisir comme électrode positive une lame de matière *non attaquée* du tout par le liquide : c'est pourquoi on a rejeté le cuivre, qui est légèrement attaquable par l'acide sulfurique, et pourquoi on l'a remplacé par le charbon des cornues à gaz, matière peu coûteuse, très dure, très conductrice pour l'électricité, et, de plus, absolument inattaquable pour tous les liquides employés dans les piles.

Toute une litanie de qualités, comme on voit.

Aussi les usines à gaz n'ont-elles bientôt plus suffi à fournir le charbon de cornue réclamé par les électriciens : toute une industrie s'est créée, qui a pour but de produire ce charbon artificiellement — en accentuant même ses qualités — tant pour les besoins de la fabrication des piles que pour ceux de l'électrochimie et la confection des crayons de lampes à arc.

Si l'électrode positive doit opposer au liquide l'impassibilité la plus absolue, l'électrode négative, elle, doit au contraire, mais pour la même raison, être très énergiquement attaquée.

Ainsi, une fourmilière d'inventeurs découvrent ou s'imaginent découvrir qu'on pourrait employer du fer comme électrode soluble : ce serait, en effet, très économique ; on continue pourtant à donner la préférence au zinc, parce que, tout en n'étant pas très coûteux, surtout relativement aux autres produits employés dans la pile, il est plus énergiquement attaqué que le fer et fournit dans les mêmes conditions une force électromotrice sensiblement plus élevée.

Par contre, il existe d'autres métaux bien plus attaquables que le zinc : tels sont, par exemple, l'aluminium, le lithium, le sodium. Avec ce dernier et de l'acide chromique comme liquide excitateur, on peut obtenir jusqu'à 4,5 volts au lieu des 2 que fournissent nos meilleures piles usuelles. Malheureusement, le prix de tous ces métaux est si élevé qu'on ne peut songer à les employer dans les piles ; on se contente du zinc et on se trouve heureux des 2 modestes volts qu'il donne assez économiquement dans les bonnes piles. Economiquement, entendons-nous : quand on n'a pas autre chose que des piles à sa disposition !

Amalgamation du zinc. — C'est donc le zinc que nous retrouvons dans toutes les piles, pauvre victime... toujours mangée ! Il faut bien ajouter, d'ailleurs, qu'il se signale encore à l'attention des électriciens et se recommande à leur faveur par une propriété fort intéressante.

Si vous constituez l'électrode négative d'une pile par une lame de zinc *ordinaire*, il vous sera aisé de constater que cette lame se dissout dans le liquide très rapidement, sans se soucier le moins du monde si la pile travaille sur un conducteur extérieur ou si, au contraire, elle n'a à fournir aucun courant, étant, comme on dit, à *circuit ouvert*.

De là, l'expression qu'une telle pile *use à circuit ouvert*, défaut bien grave, puisqu'elle consomme des produits coûteux et ne nous donne rien en échange.

Voilà un point de ressemblance fâcheux avec la plus noble conquête de l'homme, le cheval... de fiacre, qui, à l'écurie ou dans l'exercice de ses fonctions, avale son picotin d'avoine avec la même avidité.

Amalgamons, au contraire, préalablement notre lame de zinc sur toute sa surface, en la brossant avec une brosse dure dans une cuvette renfermant du mercure et de l'acide sulfurique étendu. En employant cette lame comme électrode négative dans une pile à deux liquides, nous constaterons qu'elle ne s'use plus que très peu — pas du tout dans certaines piles — lorsque l'élément ne débite pas. Pour qu'il y ait usure, il faudra que nous fassions débiter la pile.

On peut expliquer cela approximativement en remarquant (voir p. 30) que, quand la pile ne débite pas, c'est *sur le zinc* que se dégage l'hydrogène, lequel a lestement recouvert le métal de la gaine gazeuse que nous connaissons bien. De là, impossibilité pour le liquide d'arriver au métal et, par suite, cessation de l'attaque. C'est donc encore une sorte de polarisation qui intervient ici, mais polarisation protectrice cette fois, et presque instantanée, puisque le gaz n'a qu'à rester là même où il est produit. Dès l'instant, au contraire, où l'on fait débiter, le gaz se porte, comme nous le savons, sur l'autre électrode et permet à l'action chimique de s'exercer à nouveau avec vigueur, sur la surface redevenue nette du métal négatif.

La pile, dans ces nouvelles conditions, ne dépense donc plus que proportionnellement à ce que nous lui demandons : elle cesse, à peu près, de brûler ses produits dès que nous avons fini de nous en servir, et ceci, sans que nous ayons à nous en occuper. Ce n'est donc plus au lamentable cheval de fiacre qu'il convient de comparer la pile perfectionnée par l'amalgamation du zinc, mais à l'automobile, qui ne dépense que lorsqu'il travaille et ne songe pas, au repos, à absorber sa réserve de pétrole.

Mais, pour que tout ceci soit exact, il faut que l'amalgamation soit entretenue soigneusement. Quelquefois, dans ce but, la partie inférieure du zinc plonge dans un petit récipient rempli de mercure, d'où ce métal monte par capillarité sur toute la surface de l'électrode (Radiguet).

Une autre pratique, très recommandable, consiste à amalgamer le zinc dans la masse : on fait bien sécher le mercure, afin d'éviter les projections, on l'enferme dans un cornet de papier et, au moyen

d'une cuiller, on le plonge dans le zinc en fusion. L'amalgamation se produit très vite, et il faut rapidement couler dans des moules, afin d'éviter l'évaporation du mercure, dont nos poumons pourraient avoir à se plaindre.

Dans tous ces procédés, le mercure ne prend aucune part aux réactions chimiques : le zinc usé, on retrouve intégralement le singulier liquide à l'état de globules au fond des éléments.

Quelles que soient les louanges que nous avons décernées à l'amalgamation, nous devons constater que, dans certains cas, l'action protectrice du mercure est illusoire. Ainsi, dans les piles à bichromate *à un seul liquide* que nous avons rencontrées (p. 31), un dispositif spécial est affecté au relèvement des zincs au-dessus du liquide. Si en effet on ne prenait pas cette précaution dès qu'on a fini de se servir de la pile, les zincs, si bien amalgamés qu'on les suppose, auraient tôt fait d'être rongés.

Ceci se comprend facilement, d'ailleurs, puisque dans ces piles le dépolarisant, existant dans toute la masse du liquide, *mange* l'hydrogène partout où il le trouve, s'opposant aussi bien à la formation de la gaine protectrice sur le zinc de la pile au repos qu'à celle de la gaine perturbatrice sur le charbon de la pile en activité [1].

Mais, même dans ce cas, l'amalgamation se justifie en ce qu'elle diminue la dépense de zinc pour une même quantité d'électricité produite.

PILES PRATIQUES

Donnons maintenant à nos lecteurs une idée des piles usuelles par l'examen rapide de quelques-uns des types les plus connus. Nous avons déjà, à propos des piles à dépolarisant et à un seul liquide, dit quelques mots des batteries à treuil et des piles-bouteilles, et nous venons de voir que, fortement attaqués même à circuit ouvert, les zincs de ces piles doivent être maintenus en dehors du liquide quand on ne s'en sert pas. En outre, en activité, la pile dépense deux ou trois fois plus de zinc qu'il n'est théoriquement nécessaire. Enfin, elle est peu constante. Ces propriétés ne plaident pas très éloquemment en faveur de ce genre de piles et il leur faut préférer les piles à deux liquides.

---

1. On peut expliquer les faits d'une autre façon, qui revient au même, en disant que l'oxygène nécessaire à la dissolution du zinc pouvant être fourni bien plus aisément par le dépolarisant que par l'eau, celle-ci n'est pas décomposée et ne dégage donc pas d'hydrogène protecteur : d'où attaque à circuit ouvert.

Piles Daniell; ses modifications. — Inventée vers 1836; quelques cheveux blancs sur la conscience; malgré cet âge respectable, est restée sans rivale jusqu'à ce jour au point de vue de la constance (*fig.* 18).

Sous sa forme moderne, la pile Daniell comporte un vase de verre renfermant la solution acidulée sulfurique et le zinc amalgamé habituels, tandis qu'un vase poreux central renferme une lame de cuivre rouge percée de trous et plongeant dans une solution de sulfate de cuivre maintenue saturée à l'aide d'une réserve de cristaux de ce sel. Du sulfate de zinc se forme à l'extérieur, tandis que le sulfate de cuivre, réduit par l'hydrogène, dépose une couche de cuivre sur l'électrode positive. F. é. m. = 1,08 volt. Ne convient que pour produire des courants assez faibles, 1 à 2 ampères.

Comme toutes les bonnes choses, la pile de Daniell a été le point de mire d'une multitude d'inventeurs. Ses modifications se comptent

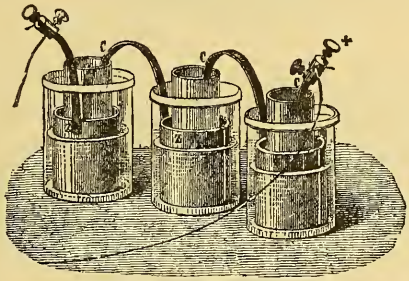


Fig. 18. — Pile Daniell.

par douzaines, pas meilleures les unes que les autres, naturellement. Pourtant, faisons une mention spéciale pour l'Allemand Meidinger et le Français Callaud, qui ont supprimé le vase poreux en utilisant pour la séparation des deux liquides leur différence de densité.

Pile Bunsen. — A deux liquides, comme sa camarade. Mais le dépolarisant est de l'acide azotique, auquel M. d'Arsonval préfère toutefois un mélange à parties égales d'acides chlorhydrique et azotique augmenté de son volume d'eau. Dans le vase poreux (*fig.* 19), plongeant dans le dépolarisant, est l'électrode positive, constituée par un prisme de charbon.

D'un emploi moins qu'agréable par suite des vapeurs nitreuses, épouvantables à respirer, qui se dégagent pendant le fonctionnement.

F. é. m. = 1,9 volt au début. Peut fournir des courants très intenses, allant pratiquement à 5 ampères et plus pour un élément de 20 centimètres de haut.

Pile Radiguet. — Les piles dans lesquelles le dépolarisant est

du *bichromate* de potasse ou de soude n'ont pas les inconvénients... olfactifs de la pile Bunsen.

De plus, l'amalgamation du zinc, à condition d'être parfaite, produit d'excellents résultats dans celles de ces piles qui sont à deux liquides. Aussi en existe-t-il un grand nombre, toutes plus idéales les unes

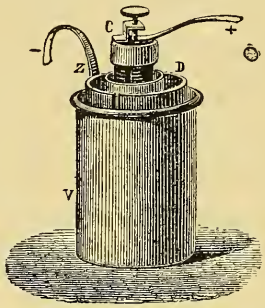


Fig. 19. — Pile Bunsen.

que les autres au dire de leurs inventeurs, pour le plus grand embarras du monsieur amateur qui ne s'y connaît pas.

La pile Radiguet est l'une des meilleures (*fig.* 21).

Le dépolarisant, contrairement à l'habitude, est à l'extérieur, ainsi

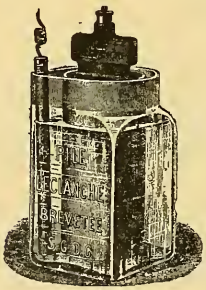


Fig. 20. — Pile Leclanché.

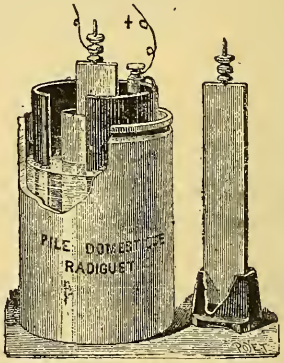


Fig. 21. — Pile Radiguet.

que le ou les charbons. Le zinc en rognures ou en lame et le liquide excitateur sont dans le vase poreux, disposition qui permet de faire plonger la partie inférieure du zinc dans une petite cuvette remplie de mercure. L'amalgamation reste ainsi parfaite, le zinc peut rester indéfiniment dans le liquide sans la moindre attaque, de sorte que la pile est toujours *sous pression*, prête à entrer en service, à faire jaillir la lumière dès qu'on en a besoin.

F. é. m. initiale, 2 volts. L'élément de 21 centimètres de hauteur peut débiter 2,5 ampères pendant 10 à 12 heures, après quoi il faut renouveler l'eau acidulée du vase poreux. Le dépolarisant, lui, dure quatre fois plus de temps.

Pile Leclanché. — La pile la plus employée en France : met en branle les 99 centièmes des milliers de sonneries qui tintent dans notre beau pays ; cela vaut bien qu'on s'y arrête un peu (*fig.* 20).

Cette pile, dont le liquide excitateur, solution à 150 grammes par litre de sel ammoniac, n'a à grignoter qu'un simple petit bâton de zinc, est à dépolarisant *solide :* c'est une substance que l'on trouve en abondance dans la nature, le bioxyde de manganèse. Mais l'action dépolarisante de cette substance est très lente. Si on demande à la pile un courant intense, la dépolarisation n'est pas assez rapide pour empêcher la gaine perturbatrice de se former après quelques instants et le courant baisse rapidement. Si l'on cesse alors de faire travailler la pile, l'action dépolarisante continue lentement et remet bientôt la pile en état de fonctionner.

Évidemment, nous n'avons plus là une pile très constante, comme il est absolument nécesssaire lorsque, par exemple, nous voulons alimenter une lampe, mais ces conditions sont parfaitement suffisantes lorsque nous n'avons besoin que d'un travail *intermittent.* Et que de qualités alors ! non seulement les produits qu'elle emploie sont des moins coûteux, mais encore l'absence d'usure lorsque la pile ne fonctionne pas est *absolue*, ce qui provient de ce que le dépolarisant, étant solide, ne peut venir faire d'excursion indiscrète autour du zinc pour y mettre à mal la gaine protectrice (Voir p. 36). Aussi, une fois chargés, trois ou quatre éléments peuvent-ils alimenter pendant des mois et des mois, sans qu'on ait à s'en occuper, sonneries, téléphones, horloges électriques.

Et pour tout cela, durant tout ce temps, deux ou trois petits bâtons de zinc à peine à se mettre sous la dent...

Que pèse le chameau devant une telle sobriété !

CHAPITRE QUATRIÈME

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Influence des dimensions des conducteurs. — Intensité et différence de potentiel sont devenues pour nous des grandeurs familières. Passons maintenant à une notion extrêmement importante que nos deux vases communiquants, véritables bouteilles de Robert-Houdin, vont nous livrer avec leur bonne grâce accoutumée.

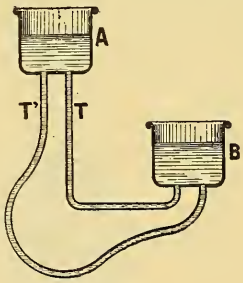


Fig. 22.

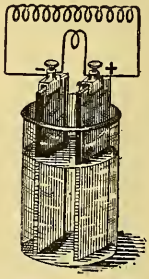


Fig. 23.

Fig. 22. — Les deux vases A et B étant reliés par deux tuyaux de même grosseur, mais l'un T' plus long que l'autre T, le liquide passe moins aisément dans T'.
Fig. 23. — Les deux pôles de la pile étant reliés par deux conducteurs de même section, mais l'un plus long que l'autre, le courant éprouve une plus grande résistance à passer à travers le conducteur le plus long.

Il faudrait, en effet, que vous fussiez de bien mauvaise composition pour ne pas admettre que l'intensité du débit liquide entre ces deux vases dépend des *dimensions du tuyau* de communication. Mettons pourtant les points sur les *i*.

Ajoutons à côté du premier tuyau T un second tuyau T' de même diamètre que T, mais plus long (*fig.* 22). Il est bien

clair que le liquide éprouvera plus de difficulté pour traverser ce tuyau que pour traverser le premier et, on devra, par suite, s'attendre à le voir parcouru par un courant liquide *moins intense*. C'est ce qui a lieu effectivement. D'où la conception de *résistance* opposée au passage du courant liquide dans les tuyaux : nous définirons cette grandeur en disant que *plus la résistance de tuyau est grande, plus est faible le courant qui le traverse* sous l'action d'une certaine différence de niveau. Il est donc évident que la résistance d'un tuyau *augmente avec sa longueur*.

Je suppose maintenant que la communication entre A et B soit assurée (*fig.* 24) par deux tuyaux T, T', de même longueur,

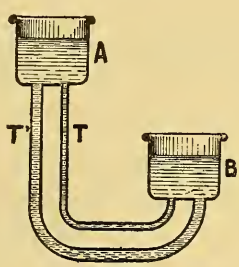


Fig. 24.

Fig. 25.

Fig. 24. — Les deux vases étant reliés par deux tuyaux de même longueur, mais l'un T' plus gros que l'autre T, le liquide s'écoule plus facilement par T' que par T.

Fig. 25. — Les deux pôles de la pile étant reliés par deux conducteurs de même longueur, mais l'un plus gros que l'autre, le courant éprouve moins de résistance au passage à travers le conducteur le plus gros.

mais de *sections* différentes. Grave question : le débit sera-t-il moindre dans le petit tuyau que dans le gros ? J'imagine que la réponse ne fait pas de doute pour vous ; et, d'après la définition précédente, nous concluons que le petit tuyau oppose au passage du courant une résistance *plus grande*. La résistance d'un tuyau *augmente* donc lorsque sa section *diminue*.

Le courant électrique ayant été assimilé à un écoulement, vous ne serez pas étonné de voir ces conclusions s'appliquer textuellement aux conducteurs électriques :

1° De deux conducteurs de même nature, de même section et de longueurs différentes, *le plus long* offre au courant le

passage le plus difficile, *la plus grande résistance.* Si nous relions les deux pôles d'une source d'électricité à la fois par ces deux fils (*fig.* 23), le courant passera *à la fois* dans l'un et l'autre fil, puisque les deux extrémités de chacun sont placées à des niveaux électriques différents; mais il passera plus facilement, sera plus intense dans le fil le plus court; peut-être pourrons-nous constater que celui-ci s'échauffe davantage;

2° De deux conducteurs de même nature, de même longueur et de sections différentes, *le plus gros* offre au courant le passage le plus facile, *la moindre résistance.* Si donc les pôles d'une pile sont réunis simultanément par ces deux conducteurs (*fig.* 25), le courant sera plus intense dans le plus gros.

En réunissant ces deux observations, nous conclurons que la résistance électrique, ou simplement la *résistance* d'un conducteur, est d'autant plus grande que sa longueur est plus grande et sa section plus petite.

Influence de la nature des conducteurs. — En hydraulique, les dimensions d'un tuyau suffisent généralement pour caractériser la résistance que ce tuyau oppose au passage d'un courant liquide. Quelquefois cependant ce peut n'être pas suffisant.

On peut rappeler à ce sujet certaine histoire qui fit dernièrement quelque bruit dans le Landerneau parisien. Le Service des eaux, ayant constaté que le débit de certaine conduite d'eau de Seine de la rue de Buffon avait diminué dans d'étranges proportions, résolut de trouver la clef du mystère. La canalisation fut éventrée, et un spectacle suggestif s'offrit aux yeux affriolés des braves contribuables du quartier. Une appétissante purée remplissait aux trois quarts l'énorme conduite, dans laquelle frétillait à cœur joie la plus jolie collection de vers, d'asticots et autres aimables bestioles qu'il soit possible d'imaginer. Non contente de fournir le boire à ses abonnés, l'Administration des eaux, vraiment maternelle, prétendait en même temps leur servir le manger...

La morale de cette histoire, c'est que le débit de l'eau dans les tuyaux peut dépendre non seulement de leurs dimensions, mais aussi de ce qu'ils ont... dans le ventre. Mais, à la vérité,

c'est là un cas exceptionnel et qui n'est guère applicable... qu'aux tuyaux d'eau « pure » destinée à notre alimentation.

En électricité, au contraire — car c'est là que nous en voulions arriver — c'est toujours qu'il faut se préoccuper de ce que les conducteurs ont dans le ventre. Assurément ce ne sont pas des asticots qu'on peut y rencontrer ; mais leur *nature* est un facteur de la plus haute importance. Les différents métaux sont en effet conducteurs à des degrés très divers, le cuivre l'étant plus que l'or, l'or plus que le fer, le fer plus que le mercure, etc. Ainsi, de deux fils conducteurs de même dimensions, mais l'un en cuivre et l'autre en fer, ce sera à beaucoup près ce dernier qui présentera la plus grande résistance, la moindre *conductibilité*.

Nous voici à présent fixés sur les divers éléments qui interviennent dans la résistance d'un conducteur : la longueur de ce conducteur, sa section, sa nature.

Avant d'aller plus loin, il nous faut faire pour la résistance ce que nous avons fait pour les autres grandeurs électriques, choisir une *unité de résistance*.

Nous allons supposer pour cela qu'un fil conducteur relie les deux pôles d'une source d'électricité telle que la diff. de pot. agissante aux deux extrémités de notre conducteur soit égale à 1 volt. Si le conducteur est fin et long, sa résistance sera grande, et le courant qui la parcourra sera peu intense, une fraction d'ampère par exemple.

Armé d'une paire de ciseaux, raccourcissez le conducteur petit à petit.

Chaque raccourcissement, c'est-à-dire chaque diminution de résistance, se traduit, vous n'en doutez pas — bien que vous n'ayez encore d'autres instruments pour le vérifier que les yeux de la foi — par une augmentation du courant lorsque vous établissez le contact. Dans la réalité des choses, à cette augmentation progressive du débit correspondrait un abaissement croissant de la diff. de pot. aux bornes de la source (Voir p. 23). Mais, comme ceci ne fait rien à l'affaire, nous supposerons que la diff. de pot. agissante reste toujours égale à 1 volt.

Ceci admis, continuez à raccourcir votre conducteur.

Il vient un moment où l'intensité atteint la valeur de 1 ampère. A ce moment, la résistance du conducteur présente une valeur bien déterminée. Si, par exemple, c'est du fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre que nous employons, nous constaterons que nous avons dû en réduire la longueur à 50 mètres environ. Eh bien! c'est cette valeur particulière de la résistance que l'on a prise comme unité, et les créateurs de la nomenclature électrique internationale, pour faire plaisir aux physiciens allemands, ont donné à cette unité de résistance le nom de leur compatriote Ohm.

L'**ohm** est donc la résistance d'un conducteur tel que, soumis à une différence de potentiel de 1 volt, il se laisse traverser par un courant de 1 ampère.

Voyons maintenant ce qui a valu à ce digne Ohm de figurer si souvent dans la conversation des électriciens, où il sert de prétexte, trop souvent, à de faciles calembours.

LOI DE OHM

Je prends un conducteur quelconque, je fais agir à ses extrémités une différence de potentiel non moins quelconque. Un courant d'une certaine valeur le traverse. J'ai ainsi un système dans lequel une différence de potentiel de E volts produit dans une résistance de R ohms un courant de I ampère. Il importe de remarquer que ces valeurs ne sont pas quelconques les unes par rapport aux autres, déterminées par un pur hasard. La preuve ? Si j'augmente la diff. de pot. E en maintenant R constante, l'intensité augmente évidemment. Elle diminue, au contraire, si j'augmente la résistance R en laissant E constant. En d'autres termes, il suffit que je donne à deux de ces trois grandeurs une certaine valeur pour que la troisième prenne aussi une certaine valeur bien déterminée. Il existe donc entre elles une certaine dépendance. Le mérite de Ohm est d'avoir trouvé la relation exacte qui exprime cette dépendance. Si grand que soit votre froid pour les mathématiques, il me faut

bien vous dire que cette relation est donnée par la formule

$$I = \frac{E}{R}, \qquad (1)$$

ce qui signifie que le courant I circulant sous l'influence d'une différence de potentiel E dans un conducteur de résistance R a pour valeur le quotient de la différence de potentiel E par la résistance R.

Par exemple, si, dans un circuit donné, on a $E = 10$ volts, $R = 2$ ohms, on en conclura, sans avoir besoin de mesurer I, que le courant est de $\frac{10}{2} = 5$ ampères.

Ainsi, l'intensité est le quotient d'une division dans laquelle la différence de potentiel agissante est le dividende et la résistance le diviseur. Un simple rappel de vos connaissances arithmétiques vous montrera dès lors qu'en multipliant le diviseur R par le quotient I on doit reproduire le dividende E, d'où la relation

$$E = RI, \qquad (2)$$

qui est effectivement une autre forme de la loi de Ohm et s'exprime en disant que la différence de potentiel E existant aux extrémités d'un conducteur de résistance R, traversé par un courant I, est forcément égale au produit de la résistance par le courant.

Si, par exemple, nous avons un conducteur de $R = 2$ ohms traversé par un courant $I = 5$ ampères, nous voyons que la diff. de pot. aux bornes $E = 2 \times 5 = 10$ volts.

Enfin, puisque, d'après la formule (2), le produit de R par I est égal à E, il faut évidemment que R soit égal à $\frac{E}{I}$, car il n'y a que $\frac{E}{I}$ qui, multiplié par I, soit égal à E. Ainsi

$$R = \frac{E}{I}, \qquad (3)$$

ce qui est une troisième forme de la loi de Ohm et s'exprime en disant que la résistance R d'un conducteur parcouru par un

courant I sous l'effet d'une différence de potentiel E est égale au quotient de la différence de potentiel par l'intensité.

Si, par exemple, dans un circuit donné, nous connaissons $E = 10$ volts et $I = 5$ ampères, nous en concluons que la résistance de ce circuit $R = \frac{10}{5} = 2$ ohms.

Les applications que nous avons faites de ces trois formules à mesure de leur établissement montrent déjà que ce n'est pas pour le singulier plaisir d'ennuyer nos lecteurs que nous les avons établies; chacune, en effet, présente son utilité spéciale. On emploiera la première $I = \frac{E}{R}$, quand, connaissant dans un circuit électrique E et R on voudra déterminer I; la seconde $E = RI$ quand, connaissant I et R, on voudra déterminer E; la troisième enfin, $R = \frac{E}{I}$, si, connaissant E et I, c'est R qu'on veut déterminer.

Nos lecteurs feront bien de s'exercer à ces calculs, qui reviennent à chaque instant dans la pratique. C'est pour cela que nous avons dû y insister longuement, si fastidieux que cela ait pu paraître.

Et ce n'est pas fini, malheureusement, car il nous faut voir maintenant comment sont reliées entre elles les résistances de conducteurs de dimensions différentes.

Nous avons déjà trouvé (p. 42) que ces résistances sont d'autant plus grandes que la longueur des conducteurs est plus grande et leur section plus faible.

Maintenant que nous sommes un peu plus ferrés sur ce chapitre, nous concevrons facilement que si, par exemple, on *double* la longueur d'un conducteur, non seulement on augmente sa résistance, mais on la *double*, et que si, au contraire, on *double* sa section, on réduit à la *moitié* sa résistance.

Ainsi, plus précis que tout à l'heure, nous pourrons dire que *la résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur, inversement proportionnelle à sa section.*

Or, nous avons aussi appris précédemment (p. 43) que cette résistance, en dehors des dimensions du conducteur, ne dépend que de sa *nature.*

Ceci nous permettra d'écrire, en désignant la longueur par l et la section par s, que sa résistance R est donnée par la formule

$$R = \frac{\alpha l}{s},$$

α étant un coefficient déterminé par l'expérience, particulier à chaque métal et que l'on appelle la *résistance spécifique* de ce métal.

Cette formule permet d'obtenir R en ohms à condition d'exprimer la longueur l en centimètres, et la section s en centimètres-carrés, l'unité de longueur employée en électricité étant le centimètre, comme nous l'allons voir tout à l'heure. Quant à la résistance spécifique, elle est numériquement égale à la résistance entre les faces d'un centimètre cube de la substance. Pour des raisons un peu délicates à saisir, on exprime cette résistance spécifique en *ohms-centimètres*[1].

Voici, à ce sujet, les résistances spécifiques de quelques substances usuelles :

NOMS DES CORPS	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE en ohms-cm	NOMS DES CORPS	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE en ohms-cm
Argent recuit.....	0,000001492	Plomb comprimé...	0,000019465
Cuivre recuit.....	0,000001584	Mercure liquide....	0,000094340
Or écroui.....	0,000002077	Solution de sulfate de cuivre saturée.	29
Zinc comprimé	0,000005589		
Platine recuit.....	0,000008981		
Fer recuit.....	0,000009636		

Et voici maintenant pour vous prouver que tout ceci sert à

1. Il faut bien se garder, en effet, de confondre la *résistance spécifique* α avec une *résistance* et de l'exprimer en ohms. Car l'équation $R = \frac{\alpha l}{s}$ nous montre qu'il faut multiplier α par une longueur l et le diviser par une surface s — ce qui revient, en somme, à le *diviser par une longueur* — pour avoir une résistance. Et il faut bien pour cela que α soit une résistance *multipliée par une longueur*. C'est pourquoi on l'exprime en *ohms-centimètres*.

Voilà, direz-vous, un « charabia » bien subtil! Possible, mais, quand vous saurez que dans certain milieu électrique vous vous feriez... écharper en évaluant les résistances spécifiques en ohms, vous y regarderez peut-être à deux fois avant de vous désintéresser de la question. Et vous aurez raison.

quelque chose, ce dont vous n'êtes peut-être pas autrement convaincu :

1° Trouver la résistance d'un fil de cuivre de 2 millimètres carrés de section et de 30 mètres de longueur. Il faut, dans la formule $R = \frac{\alpha l}{s}$, faire

$$\alpha = 0{,}000001584 \text{ ohm-cm}, \qquad l = 3.000 \text{ cm}, \qquad s = 0{,}02 \text{ cm}^2.$$

D'où :

$$R = \frac{0{,}000001584 \times 3.000}{0{,}02} = 0{,}2376 \text{ ohm}.$$

2° Quelle est la section d'un fil de fer qui, ayant 23 mètres de long, présente une résistance de 1 ohm ? Il faut d'abord remarquer que la formule $R = \frac{\alpha l}{s}$ montre que, R étant le quotient du dividende αl par le diviseur s, on doit avoir

$$Rs = \alpha l,$$

ou bien encore

$$s = \frac{\alpha l}{R},$$

car dans cette dernière équation le produit Rs du diviseur R par le quotient s est bien égal au dividende αl. Or, cette relation $s = \frac{\alpha l}{R}$ est très commode dans notre cas, puisque c'est s que nous cherchons. On prendra donc

$$\alpha = 0{,}000009636 \text{ ohm-cm}, \qquad l = 2.300 \text{ cm}, \qquad R = 1 \text{ ohm},$$

et on aura s en centimètres carrés, soit

$$s = \frac{0{,}000009636 \times 2.300}{1} = 0{,}0222 \text{ cm}^2,$$

soit un peu plus de 2 millimètres carrés.

3° Quelle est la longueur d'un fil d'argent de 0,2 mm² de

section présentant une résistance de 5 ohms? Par des considérations analogues aux précédentes, on mettra l'équation de la résistance sous la forme $l = \frac{Rs}{\alpha}$, puisque c'est l qu'on cherche, et on en déduira $l = 6.700$ centimètres ou 67 mètres.

Attention, dans le calcul, à bien exprimer s en centimètres carrés !

MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES

SYSTÈME C. G. S.

Au moment où nous allions quitter avec soulagement cet ennuyeux chapitre des résistances, je m'aperçois qu'il me reste encore quelque chose à dire.

Nous venons de voir que les résistances spécifiques des métaux étaient exprimées par des fractions très petites d'ohm-centimètre.

Par contre, les résistances spécifiques des corps mauvais conducteurs, ou corps *isolants*, verre, caoutchouc, gutta-percha, etc., se chiffrent souvent par des milliards et des trillions d'ohms-centimètres. Or, cela n'a rien d'intéressant de traîner dans les calculs, ni même dans le langage, des collections de zéros, qu'ils soient d'ailleurs à droite ou à gauche de la virgule.

On a donc été amené en électricité, comme dans le système métrique usuel, à créer des multiples et des sous-multiples des unités pratiques, lesquels sont représentés par des préfixes d'origine latine ou grecque précédant le nom de l'unité considérée.

Vous apprendrez d'ailleurs avec satisfaction que ces préfixes, vous les connaissez déjà, car ils sont les mêmes que pour le système métrique, sauf quelques nouveaux venus, créés pour satisfaire aux besoins plus étendus de l'électricité.

Voici pour les multiples :

Déca, signifie 10. Peu usité en électricité ;

Hecto, 100. Ainsi, hectowatt, 100 watts, le *watt* étant l'unité

de *puissance*, dont nous parlerons bientôt. Ainsi encore, hectowatt-heure;

Kilo, 1.000. Ainsi, kilovolt, 1.000 volts, employé surtout pour évaluer le potentiel des machines statiques; kilowatt, 1.000 watts;

Myria, 10.000. Peu usité en électricité;

Méga ou *még.* 1.000.000. Ainsi, 1 mégohm veut dire 1 million d'ohms.

Voici maintenant pour les sous-multiples :

Déci ou $\frac{1}{10}$: déciampère;

Centi ou $\frac{1}{100}$: centiampère ;

Milli ou $\frac{1}{1.000}$: milliampère, millivolt;

Micro ou $\frac{1}{1.000.000}$: microampère, microvolt, microhm, microhm-centimètre, microcoulomb, etc...

Et alors, au lieu d'écrire que la résistance spécifique du cuivre est de 0,0000016 ohm-centimètre, nous écrirons simplement 1,6 microhm-cm.

Mais prenez-y garde : cette commodité plus grande de l'emploi des multiples et sous-multiples a sa contre-partie fâcheuse.

Par exemple, il faut remarquer que, si on exprime α en microhms-cm., la formule $R = \frac{\alpha l}{s}$ donnera à son tour des résistances en microhms, et il ne faudra pas oublier de diviser les résultats par 1 million pour les avoir en ohms.

Des corrections semblables sont nécessaires chaque fois qu'on se sert des multiples, de sorte qu'une attention assez grande est indispensable.

Ce qui précède a l'avantage de nous donner de précieuses indications sur la génération de ces mots à l'aspect rébarbatif que l'on rencontre si souvent en électricité : ainsi le *microcoulomb*, nom à faire tenir sages les petits enfants, résulte de la juxtaposition de deux mots très simples : *micro*, préfixe qu'on rencontre sans s'en étonner dans beaucoup de mots du langage

usuel où il signifie petit : microscope, micromètre, etc., et *coulomb*, nom d'un physicien français. De même pour kilowatt, mégohm, microvolt, etc. Tous ces noms sont de la plus entière logique.

Quant aux unités principales elles-mêmes, celles que, dans un esprit très large, on a décidé de baptiser du nom des plus illustres pionniers de l'électricité sans s'attarder à de mesquines considérations de nationalités, il ne faudrait pas croire non plus qu'elles ont été choisies au hasard, comme par exemple la livre tournois, la perche ou la toise aux siècles passés, comme actuellement encore les unités sans queue ni tête que l'Angleterre s'entête à conserver — par respect, sans doute, pour leur antiquité.

Ainsi, nous avons déjà vu que la valeur de l'ampère est déterminée par celle du coulomb, que la valeur de l'ohm est fixée par celle du volt et de l'ampère. Mais les valeurs du coulomb et du volt eux-mêmes, ainsi que celle de *toutes* les unités électriques, dépendent de trois unités fondamentales : le **centimètre**, la masse du **gramme** et la **seconde**. Ces trois grandeurs fondamentales et les différentes grandeurs électriques sont reliées par une série de relations dont l'ensemble constitue le système *C. G. S.*, abréviation qui signifie système basé sur le centimètre, le gramme et la seconde.

Nous ne pouvons pas — ayant bien d'autres choses à voir, — entrer plus avant dans cette question. Il vous suffira, pour vous douter de la valeur et de la commodité de ce système, de savoir qu'il est adopté, sans distinction d'origine, par les électriciens du monde entier : un électricien allemand, américain, voire même japonais — car l'électricien japonais commence à pulluler sur le marché — sait aussi bien qu'un Français ce que veut dire un ampère. C'est évidemment là un avantage extrêmement précieux pour les relations de pays à pays, et les électriciens sont à bon droit très fiers d'un internationalisme scientifique dont ils sont encore seuls à donner l'exemple.

RÉSUMÉ

Les conducteurs électriques, de même que les tuyaux pour les liquides, opposent au passage du courant électrique une *résistance* d'autant plus grande que leur *longueur* est plus grande et leur *section* plus petite. Cette résistance dépend aussi beaucoup de la *nature* du conducteur, les différents conducteurs étant très différemment perméables au courant. Les résistances se mesurent et s'expriment en *ohms*, l'ohm étant représenté par la résistance d'un conducteur tel, que soumis à une diff. de pot. de 1 volt, il se laisse traverser par un courant de 1 ampère.

Dans un système conducteur parcouru par un courant, la *diff. de pot.* agissante, la *résistance* du système et le *courant* produit sont liés par la loi de Ohm $I = \frac{E}{R}$, qui permet de trouver un quelconque des trois facteurs quand les deux autres sont connus.

Au point de vue quantitatif, la résistance des conducteurs cylindriques (fils) est proportionnelle à leur longueur et inversement proportionnelle à leur section. Cette résistance est, en outre, proportionnelle à un certain coefficient α, variable avec chaque substance, qui est la *résistance spécifique* de cette substance et s'exprime en *ohms-centimètres*.

Pour ne pas avoir à traîner dans les calculs de trop grands nombres, on fait souvent usage de multiples et sous-multiples des différentes unités électriques. Ces multiples et sous-multiples sont les mêmes que ceux employés dans le système métrique, à l'exception de quelques nouveaux : *méga* ou *még*, qui signifie un million, *micro*, qui signifie un millionième.

Quant aux unités électriques elles-mêmes, elles n'ont pas éte choisies au hasard, mais à la suite de laborieuses considérations d'où est sorti le système C. G. S. ou système basé sur le centimètre, la masse du gramme et la seconde.

CHAPITRE CINQUIÈME

PUISSANCE

Élargissons maintenant notre horizon... hydraulique jusqu'à la conception d'une chute d'eau déversant son flot dans quelque vallon, en une courbe gracieuse de quelques mètres de hauteur.

Que nous dit cette chute ?

Cela dépend.

Que le paysage soit superbe, que cette chute y fasse le plus ravissant effet avec la poussière liquide que le soleil irise, l'écume qui file parmi les roches au gré du torrent, le bouquet d'arbres qui se penche..., que le plaisir des yeux y soit à souhait complété par celui des oreilles, de cela, oui, nous pourrons convenir, pour ne pas nous mettre à couteaux tirés avec messieurs les artistes et messieurs les poètes, gens de fort mauvais caractère pour qui s'avise de les contredire.

Mais au fond, nous n'en avons cure.

Nous autres électriciens, êtres positifs sur lesquels les charmes de la nature ne peuvent avoir de prise, cette chute nous intéresse aussi, certes ! mais c'est pour une tout autre raison. Quitte à porter dessus une main sacrilège, nous voudrions bien en tirer quelque chose ! Mais quoi ? Tout simplement un peu de cette *énergie* qui donne le souffle à nos machines, qui est la cause de toute vie, de tout mouvement. Seulement, pourrons-nous tirer de cette chute suffisamment de cette précieuse énergie ? le jeu vaudra-t-il la chandelle de nous brouiller à mort avec artistes et poètes de tout à l'heure en leur gâtant définitivement leur cher paysage ?

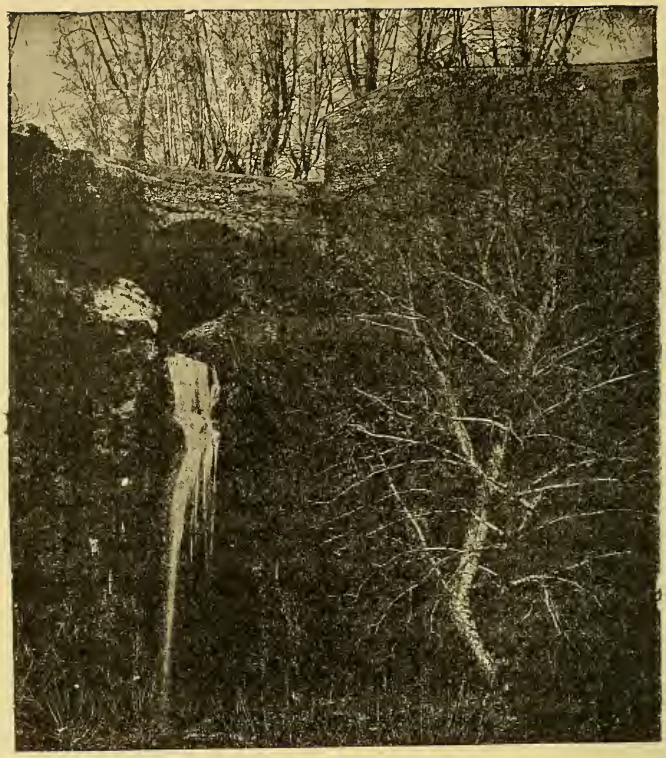


Fig. 26. — La cascade de Barjols. Cliché extrait de la collection des *Sites et Monuments de France* (Touring-Club). Chute de grande hauteur, mais de faible débit: faible puissance.

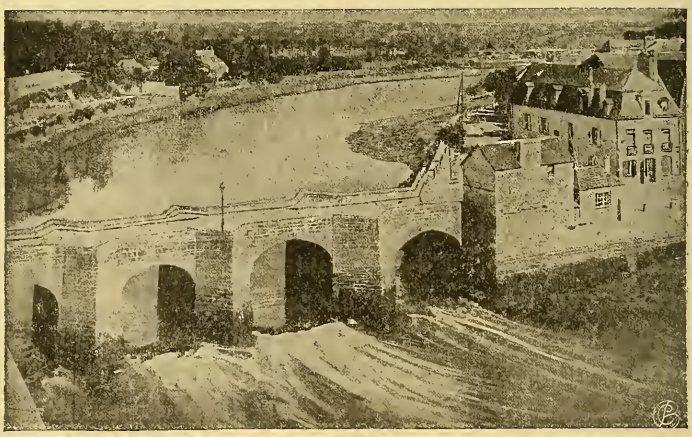


Fig. 27. — Le Loch à Auray. Cliché extrait des *Sites et Monuments de France* Chute de grand débit, mais de faible hauteur : faible puissance.

Fig. 28. — La cascade du Chadoulin. Cliché extrait des *Sites et Monuments de France*
A la fois grande hauteur et grand débit : grande puissance.

Pour cela, il faudra d'abord que nous connaissions la *puissance* de cette chute, ou, pour parler terre à terre, le nombre de chevaux qu'elle est capable de développer.

Qu'est-ce, encore, cette grandeur que nous n'avons pas rencontrée jusqu'ici dans nos bavardages hydraulico-électriques? Car nous n'avons parlé que de la différence de niveau en vertu de laquelle se produit un écoulement liquide, et que du débit de cet écoulement.

Or, la puissance d'une chute ne dépend pas exclusivement de la différence de niveau, c'est-à-dire de sa hauteur, car une chute même très haute sera très faible si elle ne débite que quelques litres par seconde (*fig.* 26).

Elle ne dépend pas non plus que du débit, car une chute même très abondante sera de faible puissance, si sa hauteur n'est que de quelques centimètres (*fig.* 27).

Pour qu'une chute soit puissante (*fig.* 28), il lui faut donc à la fois grande hauteur et grand débit, et sa puissance s'évalue en faisant *le produit* de ces deux quantités. Si on exprime la hauteur en mètres, le débit en litres (ou kilogrammes) par seconde, le produit obtenu donne la mesure de la puissance de la chute en *kilogrammètres par seconde;* et, comme un *cheval-vapeur* est égal à 75 kilogrammètres par seconde, il suffit de diviser par 75 le précédent résultat pour obtenir en chevaux la puissance théorique de la chute. Quant au *travail*, à l'*énergie* produite par la chute en un certain temps, elle est égale au produit de la puissance par ce temps (aussi s'exprime-t-elle en *chevaux-heures*), car il est évident qu'en 2 heures qu'en 3 heures, la chute effectuera 2, 3 fois plus de travail qu'en une heure.

Si donc la chute est assez puissante pour le but désiré, nous ne nous ferons aucun scrupule pour mettre la main dessus. Tant pis pour les poètes! Et c'est ainsi qu'en notre époque utilitaire, nombre de chutes grandioses ont été « domestiquées », à la grande indignation des touristes; c'est ainsi qu'un jour viendra où la cataracte de Niagara tout entière s'écoulera par de gigantesques tuyaux pour le plus grand profit de l'industrie.

Les principes bien connus qui précèdent sont exactement applicables en électricité. Un courant électrique ne peut traver-

ser un conducteur qu'en surmontant sa résistance, et cela parce qu'il se *développe* dans la source, dans le générateur d'électricité une certaine *puissance électrique*, laquelle se *dépense* dans le conducteur sous forme de chaleur.

Puissance et énergie fournies par une source d'électricité. — Le générateur électrique, c'est donc pour nous l'équivalent de la source qui alimente une chute d'eau. Pour que ce générateur soit puissant, il faudra à la fois qu'il corresponde électriquement à une grande hauteur de chute, c'est-à-dire qu'il possède une grande force électromotrice, et qu'il puisse débiter beaucoup. Et, comme dans le cas de la chute d'eau, sa puissance s'évaluera en faisant le produit de sa f. é. m. exprimée en volts par l'intensité du courant qu'il peut débiter exprimée en ampères. Le produit de ces deux nombres ne s'exprime pas en volts-ampères, ce serait trop long — et, en électricité plus qu'ailleurs, *time is money;* — on l'exprime en **watts**, du nom du célèbre mécanicien anglais auquel la machine à vapeur est redevable de ses plus importants perfectionnements.

Ainsi, une pile dont la f. é. m. est 2,5 volts et qui débite 5 ampères développe une puissance de 12,5 watts.

Comme les puissances mécanique et électrique sont facilement transformables l'une dans l'autre à l'aide soit de la dynamo, soit du moteur électrique, il est important de savoir que 10 watts équivalent à peu près à 1 kilogrammètre par seconde, et 736 watts à un cheval-vapeur [1].

Quant au *travail*, quant à l'*énergie* fournie par la source en un certain temps, comme celle d'une chute, elle est égale au produit de la puissance par le temps considéré et s'exprime en *watts-heures* [2].

Par exemple, une source qui fournit 10 ampères sous 20 volts développe une puissance de 200 watts et produit en

---

1. On exprime souvent la puissance des dynamos en *kilowatts* (1.000 watts). Le kilowatt est donc une unité un peu plus grande que le cheval : exactement, 1 kilowatt = 1,36 cheval.

2. L'unité *pratique* C. G. S. d'énergie, pour les savants, est le joule ou *watt-seconde*, beaucoup trop petit pour être employé dans l'industrie : c'est une unité pratique qui n'a, comme beaucoup d'autres choses, de pratique que le nom.

5 heures une quantité d'énergie de 200×5 ou 1.000 watts-heures, ou 1 *kilowatt-heure*, ou encore $\frac{1.000}{736} = 1,36$ cheval-heure, car, un cheval étant égal à 736 watts, un cheval-heure équivaut à 736 watts-heures.

Nous venons donc de voir que

$$P \text{ en watts} = E \text{ en volts} \times I \text{ en ampères},$$

ou

$$P = EI. \qquad (1)$$

Supposons dans cette équation $E = 1$ volt, $I = 1$ ampère. Nous avons alors $P = 1$ volt $\times$ 1 ampère. Or $1 \times 1 = 1$; donc 1 volt $\times$ 1 ampère $= 1$ watt. Cela veut dire que le watt, ou unité de puissance, est la puissance développée quand une source fournit un courant de 1 ampère sous la *pression*, sous la f. e. m. de 1 volt.

Puissance et énergie absorbées par un circuit. — Les considérations précédentes s'appliquent non seulement à la puissance *fournie* par une source d'électricité, mais à la puissance *absorbée* dans une résistance. Ainsi, un courant de 1 ampère qui parcourt un conducteur *peu résistant*, sous l'effet, par suite, d'une faible diff. de pot., a moins de *mérite*, correspond à une moindre puissance qu'un autre courant de 1 ampère qui traverse un conducteur *très résistant* sous l'effort d'une diff. de pot. très élevée. Comme pour la puissance *fournie*, il faut faire intervenir pour la puissance *dépensée* le *produit* des volts développés par les ampères résultants. Nous pouvons donc dire encore que le watt est la puissance dépensée dans un conducteur traversé par un courant de 1 ampère sous l'effet d'une diff. de pot. de 1 volt.

Ainsi, une lampe à incandescence alimentée par un courant de 0,5 ampère sous 100 volts absorbe une puissance de 50 watts.

Cette relation constante entre puissance, diff. de pot. et intensité nous permet de résoudre différents problèmes.

D abord cette relation $P = EI$ peut subir des transformations analogues à celles que nous avons fait subir à la relation établie par Ohm (p. 45) : La puissance P, étant égale au produit de E par I, peut être considérée comme le dividende d'une division dont I est le diviseur et E le quotient, de sorte que

$$E = \frac{P}{I}. \qquad (2)$$

Nous pouvons dire aussi que P peut être considéré comme le dividende d'une division dont E est le diviseur et I le quotient :

$$I = \frac{P}{E}. \qquad (3)$$

Ces trois formes d'exprimer une même loi ont chacune leur utilité spéciale.

La première forme, $P = EI$, veut dire que si une diff. de pot. ou une f. é. m. E produit dans un système conducteur une intensité I, la puissance électrique qui est dépensée dans ce système est égale au produit EI.

Si, par exemple, je sais qu'un conducteur soumis à une différence de potentiel de 10 volts est traversé par un courant de 2 ampères, j'en conclus qu'il s'y dépense $10 \times 2 = 20$ watts.

La deuxième forme, $E = \frac{P}{I}$, signifie que si dans un système le passage d'une certaine intensité I nécessite une certaine puissance P, c'est que cette intensité circule sous l'effet d'une différence de potentiel égale à $\frac{P}{I}$.

Par exemple, si dans notre conducteur de tout à l'heure je sais qu'il passe 2 ampères et que la puissance absorbée est 20 watts, j'en conclus que la différence de potentiel agissante est $E = \frac{20}{2} = 10$ volts.

Enfin, la troisième forme, $I = \frac{P}{E}$, nous dit qu'un système

conducteur soumis à E volts et dans lequel la puissance développée est P watts, est traversée par $\frac{P}{E}$ ampères. Si, par exemple, $P = 20$ watts, $E = 10$ volts, c'est que $I = \frac{20}{10} = 2$ ampères.

En somme, si l'on connaît deux quelconques des trois facteurs, P, I, E, qui interviennent dans un système conducteur, on peut toujours trouver le troisième. Si c'est P qu'on ne connaît pas, on prendra la première forme de l'équation; si c'est E, on s'adressera à la seconde; on utilisera enfin la troisième forme si, P et E étant connus, c'est I qu'on cherche.

Exemple : 1° Quelle puissance est absorbée dans une lampe soumise à 50 volts et traversée par 1,5 ampère? Réponse, 75 watts; 2° Quelle différence de potentiel existe aux bornes d'un fil traversé par 0,5 ampère et absorbant 18 watts? Réponse, 36 volts; 3° Quel courant traverse une lampe à incandescence absorbant 50 watts sous 110 volts? Réponse, 0,45 ampère.

Nous pourrions maintenant observer que, d'après la loi de Ohm, E étant égal à RI (p. 45), notre équation

$$P = EI$$

peut devenir

$$P = RI \times I = RI^2.$$

Nous pourrions donc recommencer sur cette équation et ses modifications des calculs analogues aux précédents. Mais nous laisserons à nos lecteurs ce soin, en leur répétant que cela leur sera très utile; car c'est souvent, par la suite, que nous aurons besoin d'exprimer la puissance dépensée dans un conducteur sous la forme RI^2.

CIRCUIT ÉLECTRIQUE

Reprenons nos deux vases communiquants (*fig.* 29). Depuis le temps que nous les interrogeons, il y a des chances pour que, plus d'un coup, le vase A se soit tari. Pour continuer à en

tirer des renseignements, il a fallu, chaque fois que cet accident s'est produit, que nous reprenions l'eau dans B et que nous la remontions dans A.

Or ce remontage, c'est aux dépens de nos muscles, c'est aux

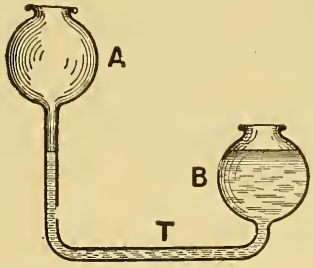


Fig. 29. — Quand A se tarit, il faut remonter le liquide B dans A : on fournit pendant cette opération l'*énergie* qui apparaît lors de la circulation du liquide.

dépens de notre *énergie* qu'il se fait. Et il faut bien qu'il en soit ainsi, puisque de l'*énergie* aussi se dépense dans l'écoulement liquide sous forme de mouvement, de frottements : Où

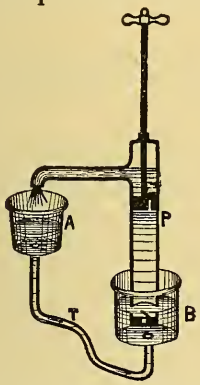


Fig. 30. — L'énergie dépensée pour manœuvrer la pompe maintient la différence de niveau entre les deux vases malgré le débit dans T.

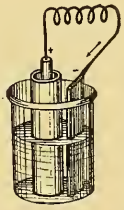


Fig. 31. — L'énergie dépensée sous forme d'action chimique dans la pile maintient la différence de potentiel entre les deux pôles malgré le débit.

le système prendrait-il le mouvement, l'énergie qu'il met en jeu si nous ne lui en fournissions pas, au moins de temps en temps ?

Il est donc nécessaire, pour avoir un écoulement continu, que notre système de vases communiquants soit complété

par un pourvoyeur d'énergie extérieure capable de remonter le liquide.

Nous pourrons, par exemple, charger de ce soin une pompe que nos muscles feront mouvoir (*fig.* 30).

Et alors, il deviendra évident que pour que le phénomène soit continu, il faut que le liquide parcoure un *cycle complet*, dans l'une des parties duquel (pompe) de l'énergie sera cédée au liquide par le fait de son élévation, et dans une autre partie duquel (tuyau) cette énergie reparaîtra soit sous forme de frottement, ou bien, par exemple, en mettant en mouvement une minuscule turbine.

Il en est de même en électricité. Nous savons qu'entre les

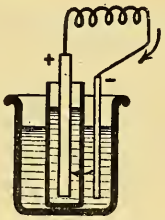


Fig. 32. — Le courant électrique circule non seulement dans le conducteur extérieur, mais aussi dans la pile, parcourant ainsi un circuit fermé.

deux pôles d'une pile existe une différence de niveau électrique capable de produire un écoulement dans un conducteur. Mais pourquoi cet écoulement ne se tarit-il pas aussitôt? Parce que l'action chimique est, comme nos muscles, une source d'énergie, et que la dissolution du zinc engage à chaque instant sous forme électrique de nouvelles quantités de cette énergie, qui sont occupées à *maintenir* la différence de niveau en dépit de l'écoulement (*fig.* 31). Ainsi, nous pouvons nous figurer que la dissolution du zinc équivaut à la manœuvre de notre pompe de tout à l'heure et que l'énergie qu'elle met en jeu fait *remonter* du pôle négatif au pôle positif la quantité d'électricité que le conducteur *descend* à chaque instant du pôle positif à ce pôle négatif.

Et, de cette façon, nous sommes conduits à admettre que la circulation électrique ne se limite pas au conducteur reliant les deux pôles, mais continue dans la pile elle-même (*fig.* 32),

dans laquelle elle se dirige du pôle — vers le pôle +.

Le cycle est donc complet. Et ce *circuit électrique* est alors caractérisé en une de ses parties (générateur) par une dépense continuelle d'énergie sous forme d'action chimique, énergie qui réapparaît dans l'autre partie du circuit (résistance extérieure) sous forme d'échauffement, de lumière, d'effets physiologiques ou chimiques, etc., dont nous pouvons tirer parti.

Tout ce que nous venons de dire s'appliquerait identiquement aux autres sources d'électricité, à cela près que, dans les dynamos, ce n'est plus de l'énergie *chimique*, mais de l'énergie *mécanique* qui est absorbée sous forme électrique ; que dans les piles thermo-électriques, c'est de l'énergie *calorifique* qui entre en jeu ; de l'énergie *lumineuse*, enfin, dans les piles actino-électriques.

Constatons enfin que voici encore justifiées certaines expressions rencontrées en cours de route, comme celles de *circuit ouvert*, de *circuit fermé*, etc.

Petit à petit notre programme se corse.

RÉSISTANCE INTÉRIEURE

Si, de par notre nouvelle conception du circuit électrique, nous avons été conduits à voir que le courant circule non seulement dans le conducteur, mais aussi à travers la pile, nous devons bien penser que, dans cette partie du circuit aussi, une certaine résistance s'oppose à son passage.

Il y a même d'autant plus de probabilités pour cela que le courant doit franchir entre les électrodes un certain intervalle liquide, et les liquides ont la réputation, sauf le mercure, liquide si bizarre que ce n'en est pour ainsi dire pas un, d'être toujours infiniment moins bons conducteurs que les métaux. Ainsi, la résistance spécifique de l'eau acidulée sulfurique est voisine de 1 ohm-centimètre, soit environ *six cent mille fois* celle du cuivre.

Effectivement, la *résistance intérieure* des piles — c'est le nom qu'on lui donne — est toujours assez grande. Il ne faut

donc pas la négliger quand on considère la résistance *totale* d'un circuit électrique, qui est la somme de la résistance extérieure R et de la résistance intérieure r. Nous lui sommes même, comme vous l'allez voir, redevables de toutes sortes d'ennuis.

D'abord, c'est à cette résistance intérieure qu'est dû le phénomène très important et déjà plusieurs fois signalé de l'*abaissement de la diff. de pot. aux bornes* d'une pile quand on ferme celle-ci sur un conducteur.

Une comparaison hydraulique va encore nous donner la clef de ce phénomène.

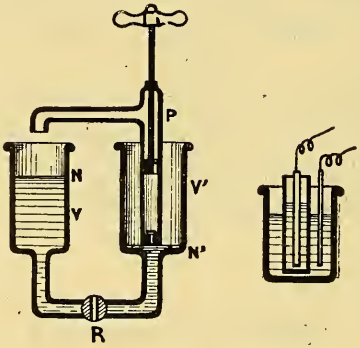


Fig. 33. Fig. 34.

Fig. 33. — Lorsque T ne débite pas, la différence du niveau entre N et N' est aussi grande que possible.

Fig. 34. — Lorsque la pile ne débite pas, la différence de potentiel entre les deux pôles est aussi grande que possible : f. é. m.

Soient deux vases V et V' (*fig.* 33) remplis de liquide à des niveaux différents et pouvant communiquer l'un avec l'autre par un tuyau T muni d'un robinet R. Dans le vase inférieur est une pompe P qui, actionnée, peut remonter le liquide dans V jusqu'au niveau N, mais non plus haut, pour la bonne raison qu'à ce moment le liquide de V' est épuisé. Comme nous l'avons déjà dit, cette pompe qui fournit au système l'énergie destinée à remonter le liquide et à perpétuer l'écoulement est l'équivalent de notre pile ; le frottement que le liquide y rencontre est l'équivalent de la résistance intérieure : une grosse pompe, pouvant débiter beaucoup, correspond à une faible résistance intérieure, et réciproquement.

Lorsque le tuyau est fermé par R, la pompe a amené dans V le liquide à son niveau supérieur N : la différence de niveau entre V et V′ est aussi grande que possible :

Elle correspond à la *f. é. m.* de la pile au repos (*fig.* 34).

Ouvrons le robinet R (*fig.* 35), ce qui, par une singularité de langage, équivaut à *fermer* le circuit de la pile.

Le niveau tend à baisser dans V, à monter dans V′. Mais en même temps, la pompe se met à fonctionner, puisque sa partie inférieure replonge dans le liquide. Alors, de deux choses l'une : ou le tuyau T est long et étroit et la pompe capable d'un grand débit (faible résistance intérieure, grande

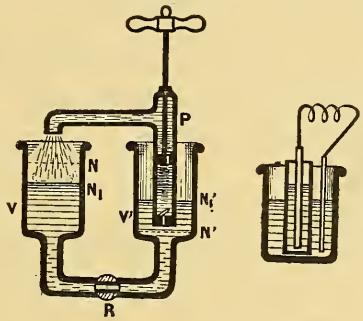


Fig. 35. Fig. 36.

Fig. 35. — Dès que R est ouvert, la différence de niveau NN′ diminue malgré le fonctionnement de la pompe, et d'autant plus que le débit de R est plus grand.
Fig. 36. — Dès que la pile débite, la différence de potentiel aux bornes devient plus petite que la f. é. m., et diminue d'autant plus que le débit est plus grand.

résistance extérieure); dans ce cas, le liquide qui s'écoule est presque immédiatement remonté dans V par le jeu de la pompe et le niveau *baisse assez peu ;* ou T est gros comparativement à la pompe (grande résistance intérieure, faible résistance extérieure), et alors celle-ci ne suffit plus à combattre l'écoulement par T, de sorte que le niveau baisse dans V et que le courant dans T se ralentit jusqu'à un certain équilibre.

Si même T est très gros, la différence de niveau peut tomber à une valeur très faible.

Appliquons textuellement ces observations à la pile : tant que la pile est à circuit ouvert (*fig.* 34), la diff. de pot. aux bornes est maintenue par l'action chimique à sa valeur maxima, que nous avons appelée force électromotrice.

Mais, dès que nous *fermons* la pile sur une résistance extérieure (*fig.* 36), la diff. de pot. aux bornes tombe aussitôt, une partie de la f. é. m. étant absorbée par le « frottement » du courant produit dans la résistance intérieure. Plus la résistance extérieure est faible par rapport à la résistance intérieure, plus le courant est intense, et plus le frottement interne est grand ; donc plus la baisse de potentiel est accentuée. Si le conducteur est gros et court, l'action chimique ne pourra plus *pomper* assez vite pour maintenir même une faible différence de niveau : toute la f. é. m. sera absorbée dans la pile et la diff. de pot. aux bornes tombera à zéro. On a une expression imagée pour exprimer cela :

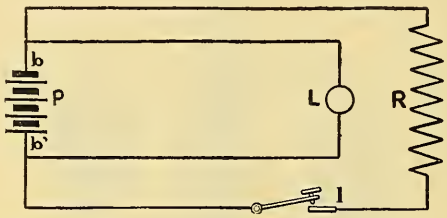


Fig. 37. — Quand on ferme l'interrupteur I, l'éclat de la lampe L diminue ; c'est un effet de la résistance intérieure de la pile.

On dit que la pile est en *court-circuit*.

Par conséquent, vous êtes averti : si vous trouvez un jour que la diff. de pot. aux bornes d'un de vos éléments de pile est nulle, il y aura beaucoup de chances pour que cela provienne d'un court-circuit inaperçu, provoqué accidentellement par le contact des deux fils ou des deux électrodes. Dépêchez-vous alors de remédier à l'accident, car, nous venons de le voir, c'est quand une pile est en court-circuit qu'elle débite et s'abîme le plus.

Les conclusions auxquelles nous venons d'arriver sont très importantes. Il est intéressant d'essayer de les vérifier par une expérience.

Supposons donc que, définitivement écœuré de votre méchante pile Volta du début, vous vous êtes construit ou procuré quelques piles au bichromate semblables à celles que nous avons décrites. Supposons aussi pendant que nous y sommes, que

vous sachiez — et cela ne tardera plus — les réunir, les *coupler* entre elles de manière à combiner leurs effets et à pouvoir, avec la *batterie* ainsi constituée, représentée sur la figure 37 par l'assemblage P, alimenter une petite lampe à incandescence L. Des bornes *b* et *b'* de la batterie partent non seulement les fils d'alimentation de la lampe mais encore deux autres fils constituant un second circuit R peu résistant et que nous pouvons ouvrir ou fermer à volonté en manœuvrant l'interrupteur I. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la lampe fonctionne normalement; dès qu'on abaisse la manette de l'interrupteur, la lampe s'éteint presque : la pile ayant à alimenter à la fois les deux circuits, son débit s'est accru, et le frottement interne a subi une augmentation dont la diff. de pot. aux bornes a dû payer les frais. Lâchez l'interrupteur, le fonctionnement de la lampe redevient normal.

PUISSANCE UTILE, PUISSANCE PERDUE

Ou je me trompe fort, ou mes lecteurs se demandent comment il se fait que depuis si longtemps, je n'ai pas fait manœuvrer dans tous ces beaux raisonnements quelques bonnes petites équations.

Pour peu qu'ils y tiennent...

Puisque la résistance totale d'un circuit comprenant une source d'électricité r débitant à travers un conducteur extérieur R est $R + r$, la loi de Ohm $I = \frac{E}{R + r}$, mise sous sa seconde forme (Voir p. 45), nous indique que la f. é. m.

$$E = (R + r)\, I = RI + rI.$$

Cela veut dire que si, par exemple, une pile de résistance intérieure $r = 0{,}5$ ohm débite sur une résistance extérieure $R = 2$ ohms un courant $I = 0{,}8$ ampère, c'est que sa f. é. m. E est égale à $2 \times 0{,}8 + 0{,}5 \times 0{,}8 = 2$ volts.

Mais cela veut dire aussi quelque chose de beaucoup plus général, car l'équation que nous venons de poser a toute une

portée philosophique que vous ne seriez peut-être pas tenté de lui attribuer.

Si en effet nos commentaires sont encore présents à votre esprit, vous savez que la résistance R, traversée par un courant I, absorbe RI volts (p. 45), et que la résistance intérieure r, traversée par ce même courant, absorbe de son côté rI volts. L'équation précédente indique que la somme $RI + rI$ de ces deux diff. de pot. absorbées dans les deux parties du circuit est précisément *égale* à la force électromotrice E de la source.

Remarquons maintenant que, si dans la pile nous fabriquons une diff. de pot. totale E, mais que dans cette même pile nous absorbons pour la circulation du courant une partie rI, il ne pourra plus apparaître aux bornes de la pile que *ce qui reste*, c'est-à-dire $E - rI$. C'est là ce que nous avons appelé la diff. de pot. aux bornes, qu'on représente généralement par e ; comme on a vu que $E = RI + rI$, il s'ensuit que notre diff. de pot. aux bornes $E - rI$ ou e peut s'écrire $RI + rI - rI$, et est donc précisément égale à RI, c'est-à-dire à ce qui est absorbé dans le circuit extérieur : c'est logique, car le circuit extérieur ne peut prendre que ce qu'on lui laisse, c'est-à-dire la diff. de pot. aux bornes.

Quant à rI, c'est ce que nous avons appelé la chute de potentiel quand la pile débite.

Nous retrouvons dès lors deux choses que nous avons devinées tout à l'heure.

D'abord, cette chute de potentiel rI sera d'autant plus accentuée que la résistance intérieure r sera plus grande.

D'autre part, elle le sera aussi d'autant plus que l'autre facteur I sera plus grand, c'est-à-dire qu'on fera débiter la pile sur une résistance extérieure plus faible.

A la limite, lorsqu'on réunit les deux pôles par un conducteur sans résistance appréciable (*court-circuit*, $R = 0$), la relation $E = RI + rI$ se réduit à $E = rI$; cela veut dire que I est alors si grand que la perte rI dans la résistance intérieure devient égale à la totalité E de la f. é. m. La diff. de pot. aux bornes tombe donc à zéro.

C'est ce que notre comparaison hydraulique nous avait fait prévoir.

La perte de potentiel dans un générateur qui débite n'est pas, on le conçoit, sans inconvénients.

D'abord, la différence de potentiel *utile*, celle qui existe entre les bornes de la pile et qui agit effectivement sur le conducteur, est diminuée d'autant. Un générateur qui débite se trouve exactement dans les mêmes conditions qu'une chute d'eau dont *une partie* seulement de la hauteur serait utilisée ; la puissance *totale* développée par cette chute est bien égale au produit du débit par la hauteur totale, mais la puissance *utile* est seulement égale au produit du débit par la hauteur réellement utilisée.

De même, tandis que la puissance *totale* d'une pile est égale, comme nous l'avons dit, à sa force électromotrice totale E multipliée par son débit I, soit EI, la puissance *utile* est seulement eI, en appelant e la diff. de pot. aux bornes. Quant à la différence entre la puissance totale et la puissance utile, soit $(EI - eI)$, ou $(E - e)\,I$, c'est la puissance *perdue* dans la pile sous forme d'échauffement pour vaincre la résistance intérieure.

Nous pouvons remarquer d'ailleurs que $E - e$, différence entre la f. é. m. et ce qui apparaît aux bornes, n'est autre chose que la chute de potentiel dans la pile, et nous avons dit (page précédente) que cette chute est égale à rI.

La puissance perdue dans la pile $(E - e)\,I$, peut donc aussi s'écrire $rI \times I$ ou rI^2.

On voit donc que, si la pile est susceptible de fournir une certaine puissance, nous en perdons inutilement, sous forme d'échauffement du liquide, une portion rI^2 d'autant plus grande que la résistance intérieure r est plus grande.

Or, première pierre dans le jardin de cette pauvre résistance intérieure, cette perte n'a rien d'agréable, car on sait ce que coûte l'énergie produite par les piles quand on en a usé pendant quelques années !

Ensuite, chose peut-être plus grave encore, la plus petite variation de débit d'une pile ou d'une batterie à grande résistance intérieure fait varier beaucoup la perte rI ; elle provoque

donc des variations de diff. de pot. aux bornes considérables, dont notre expérience de tout à l'heure (*fig.* 37) nous a montré les inconvénients.

On ne peut plus, par exemple, allumer une seule lampe sans faire *baisser* toutes celles qui fonctionnent déjà. En un mot, les divers appareils alimentés par une telle source sont dans la plus lamentable dépendance les uns des autres. On conçoit combien pareille chose serait grave pour une usine d'éclairage électrique, puisque, sur un réseau d'éclairage, le nombre de lampes allumées variant constamment, c'est à chaque instant que se produisent les variations de débit. Heureusement, la résistance intérieure des machines dynamos qui alimentent les circuits des stations centrales est très faible à côté de celle des piles, et cet effet se trouve par cela même presque éliminé.

La résistance intérieure est donc un défaut, un défaut que ne... dépare aucune qualité.

Comme toute chose franchement mauvaise, il faut s'attacher, sinon à l'éliminer complètement, ce qui est impossible, tout au moins à la rendre aussi petite qu'on le peut. Que faut-il faire pour cela, du moins dans les piles? Il est aisé de s'en rendre compte.

Cette résistance intérieure, nous l'avons dit, provient du passage du courant à travers la tranche liquide qui sépare les deux électrodes; cette tranche se comporte comme un conducteur, de mauvaise qualité assurément, mais enfin comme un conducteur. Pour rendre aussi faible que possible sa résistance, il faut augmenter autant qu'on le peut sa *section*, et, pour cela, envelopper complètement l'une des électrodes par l'autre; telle est la raison fort simple de l'emploi des zincs ou des charbons circulaires; il faut diminuer la *longueur* de ce conducteur, c'est-à-dire l'épaisseur de la tranche liquide, en rapprochant autant qu'on le peut les deux électrodes.

Nous verrons dans le prochain chapitre pratique les observations que soulève cette dernière condition, en parlant des piles à circulation ou à écoulement.

On conçoit aussi sans difficulté que plus un élément de pile

sera grand, plus sa résistance intérieure sera faible, pour un même écartement des électrodes, puisque la section de la tranche liquide à traverser sera plus grande. Telle est, avec la possibilité d'une plus grande durée de fonctionnement, la supériorité des grands éléments de pile sur les petits : quant à la f. é. m., nous savons (p. 24) qu'elle reste toujours identique, que l'élément soit minuscule ou qu'il soit gigantesque.

RENDEMENT D'UNE SOURCE D'ÉLECTRICITÉ

Nous parlions, il n'y a pas bien longtemps (p. 69), de puissance perdue et de puissance utile d'une pile.

Ceci nous amène à étudier son rendement.

Une pile fonctionne dans de mauvaises conditions de rendement quand la plus grande partie de la puissance qu'elle développe est perdue en chaleur dans le liquide. Cela va de soi.

Elle a, au contraire, un bon rendement si presque toute la puissance totale est dépensée dans le circuit extérieur, où elle produit un effet utile.

En un mot, le rendement est le rapport de la puissance utile à la puissance totale. Il est donc toujours plus petit que l'unité, car la puissance utile ne peut jamais être supérieure, ni même égale à la puissance totale.

On exprime un rendement en centièmes, et on dira, par exemple, qu'il est de 90 0/0, si la puissance utile est les 9 dixièmes de la puissance totale. Nous avons vu qu'en appelant E la f. é. m., e la diff. de pot. aux bornes d'une pile qui débite, et I le courant, la puissance utile est eI, la puissance totale EI. Le rendement est donc :

$$\frac{eI}{EI} \quad \text{ou} \quad \frac{e}{E}.$$

Ainsi, si $E = 2$ volts, $e = 1{,}6$ volt, on a $Rt = \frac{1{,}6}{2} = 80\,0/0$, tandis que si e tombe à 1,2 volt, c'est-à-dire si on augmente le

débit en diminuant la résistance extérieure, le rendement devient $\frac{1,2}{2} = 60\ 0/0$.

Donc, plus la diff. de pot. aux bornes est voisine de la f. é. m. E, c'est-à-dire moins la pile débite, plus le rendement est voisin de l'unité, meilleur il est.

On aurait donc intérêt, pour ne pas gaspiller une énergie si coûteuse, à ne faire marcher les piles qu'à faible débit. Mais alors, autre inconvénient : I étant très petit, la pile ne donne qu'une puissance EI bien plus petite que celle qu'elle pourrait développer. Elle est donc mal utilisée. D'autre part, si on débite beaucoup, la puissance développée est grande, mais le rendement détestable. On est donc obligé de se tenir à cheval entre ces deux extrêmes, et on fait débiter à une intensité moyenne. Cela n'empêche qu'on ne perd jamais guère moins, dans les piles, de 20 à 30 0/0 de la puissance totale, soit un rendement de 70 à 80 0/0.

Nous savons encore que $e = RI$ (Voir p. 68) et $E = (R + r)\,I$.

Donc le rendement $\frac{e}{E}$ peut encore s'écrire :

$$\frac{RI}{(R+r)I} \quad \text{ou} \quad \frac{R}{R+r},$$

et sous cette dernière forme on voit qu'il est d'autant plus près de l'unité, d'autant meilleur, que la résistance intérieure r est plus faible.

Si elle était nulle, le rendement serait représenté par $\frac{R}{R}$, il serait ainsi toujours égal à l'unité, toujours intégral ! Et, en effet, la résistance intérieure étant nulle, rien ne s'y consommerait.

Malheureusement, pile sans résistance intérieure et merle blanc sont un peu de la même famille. Les meilleurs éléments de piles à deux liquides de 20 à 25 cm de hauteur ont encore une résistance de 0,1 ohm au moins, correspondant, pour un débit de 5 ampères, à une puissance perdue $rI^2 = 2,5$ watts.

Or, 2,5 watts, c'est beaucoup pour une pile !

Il y a pourtant un cas où le rendement d'une pile est théoriquement intégral, c'est quand elle débite sur une résistance extérieure très grande. En effet, r est alors négligeable devant R, c'est-à-dire que le rendement $\frac{R}{R+r}$ se réduit à $\frac{R}{R}$ ou à l'unité. Mais alors, le courant est très faible, la pile ne débite presque rien.

Autrement dit, le rendement d'une pile est parfait quand cette pile ne sert à rien.

Arrêtons là ces exercices de calcul, que nous avons à dessein multipliés et que nous pourrions encore longtemps prolonger. Tout ce que nous pouvons affirmer au lecteur, quitte à nous entendre, avec une douce satisfaction, traiter de *rabâcheur* — il n'y a qu'en tapant sur les clous qu'on les enfonce — c'est qu'il ne perdra pas son temps en manipulant toutes ces formules, en se familiarisant avec elles et en tâchant de se rendre compte de ce qu'elles représentent.

Ainsi soit-il.

RÉSUMÉ

De même que la puissance d'une chute est caractérisée à la fois par sa hauteur et par son débit, la *puissance électrique* d'une source d'électricité est égale au produit EI de sa force électromotrice par son débit. Ce produit s'exprime en *watts*, le watt étant la puissance développée par un courant de 1 ampère circulant sous l'effet d'une diff. de pot. de 1 volt.

De même que l'écoulement entre deux vases communiquants s'arrêterait si nous n'avions pas un système susceptible de remonter le liquide au prix d'une dépense d'énergie extérieure, de même le courant électrique traversant un conducteur reliant les deux pôles d'une pile tarirait bientôt, si l'action chimique dans cette pile n'avait pour effet d'entretenir la différence de niveau entre ces deux pôles, en remontant en quelque sorte à chaque instant vers le pôle positif la quantité d'électricité que le conducteur déverse au pôle négatif.

Il faut donc s'imaginer un système conducteur parcouru par un courant comme un *circuit fermé*, la circulation se continuant à travers la source. Cette source oppose à la circulation, pour sa part, une résistance que l'on appelle *résistance intérieure*. Par consé-

quent, de la puissance *totale* fournie par la pile, une certaine partie, ou puissance *perdue*, est absorbée dans la pile sous forme d'échauffement ; l'autre partie apparaît dans le conducteur et est la puissance *utile*. On appelle *rendement* le rapport de la puissance utile à la puissance totale. Pour que ce rendement soit bon, il faut que la pile ait une faible résistance intérieure et ne débite pas trop.

C'est la résistance intérieure des sources électriques qui est cause que la différence de potentiel aux bornes d'une pile qui débite est toujours *plus faible* que la f. é. m. et *varie avec le débit*. Pour éviter ces variations très préjudiciables comme pour améliorer le rendement, on doit chercher à diminuer la résistance intérieure. On y arrive en prenant de grands éléments, en enveloppant complètement l'une par l'autre les deux électrodes et en les rapprochant autant que possible.

CHAPITRE SIXIÈME

LA LUTTE CONTRE LA RÉSISTANCE INTÉRIEURE

SUPPRESSION DU VASE POREUX

Nous savons maintenant que la polarisation n'est pas le seul ennemi des piles. La résistance intérieure en est un aussi grave. A vrai dire, ces deux malfaiteurs sont un peu de la même famille, car nous pouvons bien ajouter maintenant que, si la gaine gazeuse qui se forme sur l'électrode positive polarisée est si nuisible, c'est surtout parce qu'elle est à peu près imperméable au courant et augmente énormément la résistance intérieure.

Nous avons cherché, dans un chapitre précédent, à réduire à l'impuissance la polarisation; cherchons maintenant les moyens pratiques de nous débarrasser, dans la mesure du possible, de la résistance intérieure. D'abord, en agrandissant les éléments, nous gagnons quelque chose, c'est entendu. Mais on conçoit qu'on ne puisse aller bien loin dans cette voie, car des éléments gigantesques n'ont pas seulement l'avantage de leur grandeur, ils sont encombrants, coûteux d'achat et d'entretien.

Une chose plus intéressante à considérer, c'est l'emploi du vase poreux. Le vase poreux offre au courant une résistance appréciable à surmonter; il entre pour beaucoup dans la résistance intérieure d'une pile à deux liquides.

Mais nous savons que le vase poreux joue un rôle honorable dans la lutte contre la polarisation (chap. III), et nous ne pouvons pas lui manquer d'égards au point de le supprimer; tout au plus pouvons-nous le modifier. Au lieu de terre de pipe peu cuite, nous pouvons le constituer en baudruche ou en parchemin végétal : c'est l'idée de découverte par... quelques centaines d'inventeurs. Effectivement, nous améliorons beaucoup ainsi notre vase poreux au point de vue de la résistance; le malheur est que, si notre sac de parchemin est plus perméable au courant, il l'est bien plus aussi aux liquides, de

sorte que rapidement, dépolarisant et excitateur se mêlent en une douce intimité, et qu'au bout de peu de temps on retombe sur les inconvénients des piles impolarisables à un seul liquide : de Charybe en Scylla. Autant, alors, employer ces piles à un seul liquide, qui, elles au moins, ont la franchise de leurs opinions, et, si elles mangent vos zincs à circuit ouvert, ne le font pas subrepticement, sans que vous vous y attendiez. Vous aurez en même temps, de cette façon, une résistance intérieure très réduite. Ainsi des éléments à treuil de Trouvé, modèle de 20 centimètres de hauteur, ont une résistance intérieure de 0,07 à 0,08 ohm, alors que les piles correspondantes à deux liquides, celles de Radiguet par exemple, ont de 0,15 à 0,20 ohm.

Mais, somme toute, nous l'avons dit, ce parti n'est pas fameux.

Pile de Méritens. — A propos de suppression de vase poreux, cependant, un électricien bien connu, M. de Méritens, eut, voici

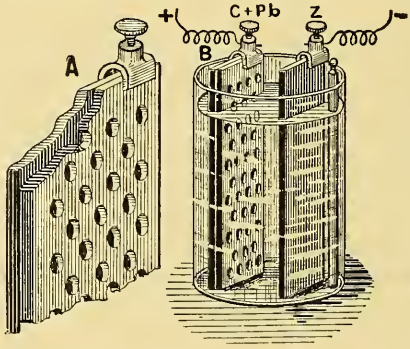


Fig. 38. — Pile de Méritens.

quelques années, une idée originale, celle d'en revenir tout simplement à la bonne vieille pile de Volta, rendue *physiquement* impolarisable.

Le plus curieux, c'est qu'il y réussit, et voici comme :

En même temps que la traditionnelle lame de zinc, plongez dans l'eau acidulée sulfurique, dit M. de Méritens, une plaque *mixte* (*fig.* 38), constituée par deux substances conductrices différentes, charbon par exemple, et plomb le recouvrant en différents points de sa surface. Vous verrez que dans ces conditions, le circuit étant fermé, l'hydrogène ne se portera pas à la fois sur les deux substances formant l'électrode positive, sur le plomb et sur le charbon, mais seulement sur l'une d'elles : celle pour laquelle il manifeste ainsi sa préférence, le charbon, est justement la substance la moins attaquée par le liquide, la plus *électro-positive*, et c'est logique,

puisque c'est pour s'y diriger qu'il a quitté déjà l'électrode négative. Donc, une partie au moins de l'électrode restera libre de tout dépôt gazeux, et de polarisation, plus l'ombre désormais ! Par conséquent, finis les vases poreux, les dépolarisants, les manipulations ennuyeuses ; plus de résistance intérieure, ou si peu... ; plus qu'un liquide excitateur inodore et peu coûteux...

L'éclairage électrique domestique et gratuit !...

Et le fait est que la pile présentée à l'appui de ses dires par M. de Méritens à certaine séance de la Société des Électriciens, parut justifier cet enthousiasme. Mise en court-circuit sur un ampèremètre, pendant la durée de la communication de son auteur, la pile débita sans une défaillance un courant de 30 ampères, que constatèrent avec stupéfaction les membres de la Société. C'était un joli résultat pour un élément dont les électrodes présentaient 1 décimètre carré de surface !

Comment se fait-il donc qu'il existe encore aujourd'hui autre chose que des piles de Méritens après une semblable démonstration ?

M. de Méritens avait-il exagéré ses conclusions, comme d'autres expériences parurent le démontrer à M. Hospitalier ? La lame de plomb *platiné* qu'il était obligé d'employer pour éviter la formation d'une couche non conductrice de sous-oxyde de plomb (?) fit-elle reculer par son prix ? La dépolarisation était-elle réellement si prolongée et si parfaite ?

Puis, il faut bien le dire, si le dépolarisant a des inconvénients, il a aussi du bon, en dehors même de son rôle « antigaineux ». Si le zinc trouvait tout préparé l'oxygène qui lui est nécessaire pour se dissoudre à l'état d'oxyde de zinc dans l'acide sulfurique de la pile, cette dissolution produirait une très grande énergie. Malheureusement, dans la pile de Volta, le zinc ne peut trouver cet oxygène que dans l'eau : il doit le disputer à l'hydrogène, rompre la combinaison qui lie ces deux gaz ; or il faut pour cela beaucoup d'énergie, presque toute celle que développe la dissolution dans l'acide. Ce n'est donc plus que *le reste* de cette énergie qui peut apparaître sous forme électrique, et c'est peu. Aussi, dans les piles genre Volta — dans notre pile de Méritens entre autres — la f. é. m. est-elle peu élevée, soit 0,8 volt au maximum.

Quand un dépolarisant est ajouté dans la pile, les choses ne se passent plus ainsi : l'eau commence bien encore par être décomposée au prix d'un effort considérable ; seulement l'hydrogène produit trouve sur son chemin l'oxygène presque disponible du dépolarisant, avec lequel il se recombine, ce qui restitue presque toute l'énergie qui avait été dépensée lors de la décomposition de l'eau, énergie qui reparaît sous forme électrique : nous reprenons d'une main, grâce au dépolarisant, ce que nous perdons de l'autre. Si donc le dépolarisant, de par le vase poreux, augmente la r. intér. de la pile, par contre il exerce une action précieuse en vertu de laquelle la f. é. m.

est beaucoup augmentée. C'est grâce à cette action, en effet, que la f. é. m. de beaucoup de piles usuelles peut atteindre et dépasser 2 volts.

Mais, pour en revenir à la pile de Méritens, on voit qu'en plus des inconvénients déjà signalés, elle a encore celui d'une f. é. m. très faible.

Sans doute faut-il voir dans ces diverses raisons les causes de son enterrement rapide, car le fait est qu'après sa sensationnelle apparition, on n'en entendit plus parler.

Peut-être, en la perfectionnant un peu, pourrait-on l'exhumer avec avantage.

En dehors de ce dispositif réellement très intéressant de la pile de Méritens, force nous est de reconnaître que le vase poreux n'est décidément pas, dans une pile, chose commode à supprimer. Nous nous y résignerons donc et nous demanderons à d'autres moyens de réduire la résistance intérieure.

PILES A ÉCOULEMENT

Rappelez-vous que la couche liquide qui sépare les deux électrodes et que le courant doit franchir est un conducteur comme un autre : on en doit diminuer la résistance en réduisant la longueur à traverser, c'est-à-dire son épaisseur.

Pourquoi, alors, s'embarrasser de la résistance intérieure, vous exclamez-vous ! Ne voilà-t-il pas un admirable moyen de la réduire autant que nous voulons ? Ne pouvons-nous pas rapprocher jusqu'à la plus extrême limite nos deux électrodes, à la condition de ne les faire toucher en aucun point, c'est-à-dire de n'établir aucun court-circuit ?

Votre remarque est parfaitement juste... en théorie, comme beaucoup d'autres choses. Si vous essayez de la mettre en pratique, vous ne tarderez pas à déchanter. Pourquoi ? D'abord parce que, dans votre désir de... rapprochement, vous en avez oublié le vase poreux. Ensuite, parce que vous avez omis dans votre raisonnement une chose essentielle, à savoir que, si les deux plaques sont extrêmement voisines, séparées par 1 ou 2 millimètres, la circulation du liquide est rendue très difficile. Voyez alors les conséquences : quand la mince couche interposée est épuisée, et cela demande tout juste quelques instants, plus d'action chimique ; alors bonsoir ! la f. é. m. tombe comme la flamme d'une lampe qui n'a plus d'huile, tandis que pourtant, de l'autre côté des électrodes, le liquide est encore presque intact. En somme, il faut vous rendre justice, vous aboutissez bien à la faible résistance intérieure que vous rêviez, mais, même polarisation à part, la f. é. m. obtenue n'est même pas capable de la franchir. Beau résultat !

Percez-vous de nombreux trous les électrodes, le résultat devient un peu meilleur, pas beaucoup.

C'est cette raison qui justifie la pratique suivie dans les piles ordinaires de laisser entre les deux électrodes un espace assez grand pour y pouvoir loger, outre le vase poreux, une suffisante réserve de liquide. Comme, de plus, il s'établit toujours une lente circulation par le fait de l'échauffement, des différences de densités, des dégagements gazeux, le liquide entre les électrodes se trouve renouvelé avant épuisement, surtout si ces électrodes sont percées de trous.

Pourtant, nous avons mis le doigt sur un des gros défauts de toutes les piles étudiées jusqu'ici :

Que sont ces piles, au fond ? Ce sont des appareils qui envoient au dehors quelque chose — ce quelque chose étant de l'énergie électrique — sans jamais rien recevoir depuis le moment où on les a chargés jusqu'à celui où on les charge de nouveau.

Or, les animaux ne sont pas seuls à refouler devant le travail lorsqu'ils n'ont plus rien ou plus grand'chose dans le ventre. Les piles logent à la même enseigne : à mesure que leur nourriture se consume, que les liquides s'épuisent, l'effort dont elles sont susceptibles va en s'affaiblissant, la f. é. m. diminue.

En pratique, cet inconvénient est toujours grave, parce qu'on doit laisser le niveau s'abaisser beaucoup, les produits s'user notablement avant leur remplacement, sous peine de gaspiller ces produits et d'augmenter dans une trop forte mesure le prix du courant, déjà suffisamment respectable comme cela.

On conçoit donc qu'en fait, l'épithète de piles constantes, appliquée aux piles précédentes, n'est qu'un leurre et signifie tout au plus piles *plus constantes* que celles qui ne le sont pas du tout.

Conditions d'une bonne pile. — Que faire, pour remédier à ce mal ?

Vous le devinez.

Au lieu de laisser le liquide en stagnation dans la pile, il faut le renouveler lentement, mais continuellement, de manière à remplacer à chaque instant les molécules de liquide épuisées par du liquide neuf et actif. Dans ces conditions, la pile restera toujours comparable à elle-même et pourra vous donner *indéfiniment* — sauf remplacements périodiques du zinc — une f. é. m. rigoureusement constante.

Dans la *pile à écoulement* ainsi réalisée, nous *forçons* donc le liquide à circuler entre les électrodes. Un nouvel avantage en est la conséquence immédiate : il n'y a plus d'inconvénient ici à mettre à profit votre remarque de tout à l'heure, en rapprochant extrêmement les électrodes.

Nous ne les rapprocherons pas assez, toutefois, pour ne pouvoir interposer entre elles un vase poreux, car nous savons que nous

diminuons ainsi la dépense de matière, et que nous n'avons plus à nous préoccuper de l'attaque des zincs à circuit ouvert.

Malgré le vase poreux, d'ailleurs, le gain sur la résistance intérieure sera encore très grand.

Mais ce n'est pas seulement à ces deux points de vue importants, constance de la f. é. m., petitesse de la rés. intérieure, que les piles à écoulement sont remarquables.

Une pile ordinaire nécessite une provision de matières actives assez importante dès qu'on ne se résigne pas à des manipulations extrêmement fréquentes ni à une baisse trop rapide de la f. é. m. C'est donc un instrument relativement assez volumineux, partant assez coûteux, et une batterie d'une dizaine d'éléments, outre son prix, nécessite une place que l'on n'est pas toujours à même de lui donner. Tout le monde n'a pas la Galerie des Machines à sa disposition.

Dans une batterie à écoulement, au contraire, par cela même que les électrodes sont très rapprochées, il est possible de réduire à la plus extrême limite le volume des éléments. Le liquide disponible dans chacun d'eux peut au besoin se réduire à quelques dizaines de centimètres cubes si son renouvellement est assez rapide. Aussi les dimensions de la batterie peuvent-elles devenir remarquablement exiguës, tout le volume encombrant se localisant dans les récipients d'alimentation d'une part, dans ceux de réception du liquide épuisé d'autre part.

Si la circulation des liquides est, en outre, suffisamment rapide, il s'ajoute aux importants avantages qui viennent d'être signalés une action *mécanique* du liquide en mouvement sur l'hydrogène, action qui complète celle de la dépolarisation chimique et est une garantie supplémentaire de constance.

Voilà, n'est-il pas vrai, un ensemble de qualités qui plaide éloquemment en faveur des piles à écoulement. Aussi allons-nous dire quelques mots de leur réalisation pratique.

Remarquons, avant d'entrer en matière, que les piles à écoulement se construisent généralement par *batterie*, non par élément isolé [1]. De cette manière, on peut faire passer les liquides d'un élément à l'autre, ce qui permet d'avoir une circulation relativement rapide, tout en utilisant bien les produits. De là la disposition des éléments en *cascade*, les uns au-dessous des autres, disposition réalisée pour la première fois dans la pile Camacho. Quand les liquides ont traversé l'élément inférieur, on peut admettre qu'ils sont assez épuisés pour être jetés.

A vrai dire, dans ces conditions, les derniers éléments ont une

---

1. Nous verrons dans le chapitre suivant à relier convenablement entre eux les divers éléments qui composent une batterie pour les faire concourir à une action donnée.

f. é. m. un peu plus basse que les autres, puisqu'ils sont alimentés par du liquide presque épuisé ; mais cette f. é. m. elle-même n'en reste pas moins *constante*, puisque la composition du liquide se maintient toujours identique à elle-même. Or, surtout en fait d'éclairage, f. é. m. faible, mais *constante*, vaut mieux que f. é. m. élevée, mais *variable*.

Pile Mauduit. — Nous citerons d'abord un modèle dans lequel les principes qui précèdent ont été médiocrement appliqués. D'abord c'est une pile à un seul liquide — mais elle présente en

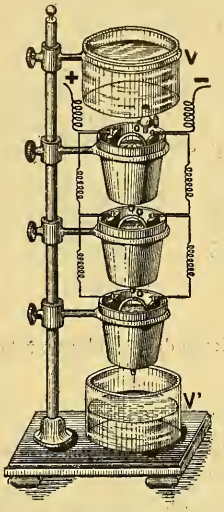


Fig. 39. — Pile Mauduit.

manière de compensation l'avantage de pouvoir être construite par le premier amateur venu.

La pile Mauduit se compose de plusieurs éléments disposés les uns au-dessus des autres sur les étages successifs d'un support de chimie (*fig.* 39) ou d'un meuble en bois que le moins menuisier des amateurs aura la prétention de construire, en lui donnant au besoin des dimensions telles que plusieurs éléments puissent se loger sur chaque tablette.

Comme vases extérieurs, M. Mauduit a jeté son dévolu — idée bizarre — sur de vulgaires *pots à fleur* en terre, qu'il élève à la hauteur de leur mission en les enduisant intérieurement et à chaud d'une mixture ainsi composée :

Coaltar	300	grammes.
Bitume	100	—
Suif	50	—

Les réservoirs alimentateur et récepteur V et V', munis de robinets pour régler l'écoulement, étant placés l'un au-dessus, l'autre au-dessous, on conçoit que, pour réaliser une pile à écoulement au sens strict du mot, il suffirait de faire passer par le trou dont est percé le fond de chaque vase, à l'aide d'un bouchon de caoutchouc, un simple tube droit qui arriverait presque à la partie supérieure du vase correspondant (*fig.* 40, *a*) et constituerait un trop-plein se déversant dans le vase inférieur.

Mais si l'on opérait ainsi, ce serait le liquide de la partie supérieure de chaque vase qui serait évacué ; or, le liquide, en s'épuisant, augmente de densité et gagne le fond : c'est ce liquide de la partie inférieure qu'il faut arriver à évacuer.

Nous sommes donc conduits à recourber le tube d'évacuation de manière à amener son orifice jusqu'à cette partie inférieure (*fig.* 40, *b*). Mais ce dispositif est encore défectueux, car, dès que, par suite de l'écoulement du vase supérieur, le niveau liquide dépassera la cour-

Fig. 40. — Mécanisme de l'écoulement dans la pile Mauduit.

bure supérieure du tube, le siphon s'amorcera et l'écoulement ne cessera que lorsque tout le liquide aura déguerpi. Moyen trop radical... même par le temps qui court !

Que faire, alors? C'est ici que M. Mauduit s'est montré tout à fait machiavélique. Son tube recourbé étant en *plomb*, il l'a percé au sommet de la courbure d'un trou minuscule O (*fig.* 40, *c*). Un point, c'est tout. Mettons, si vous voulez, ledit point sur les *i*.

Dès que par suite de l'écoulement du vase supérieur, le niveau du liquide dépasse le sommet de la courbure, le tube étant tout entier immergé, la longue branche se remplit d'eau, qui s'écoule dans le vase inférieur : comme le trou O est très petit, il ne peut passer par cet orifice assez de liquide pour remplacer celui qui s'écoule ; c'est donc la branche courte qui va fournir la presque totalité du débit — et ce, en liquide épuisé, puisque... puisé au fond du vase — de sorte que le tube recourbé fonctionne d'abord presque comme si l'orifice O n'existait pas. Mais le niveau baissant par suite de cet écoulement rapide, cet orifice est bientôt laissé à découvert par le liquide du vase. A ce moment, de l'air s'introduit par là dans le tube et désamorce le siphon, dont l'écoulement s'arrête jusqu'à ce que le niveau monte à nouveau et provoque un nouvel écoulement.

Ainsi, le liquide qui s'écoule est toujours le plus épuisé, et son écoulement se produit par intermittences successives.

La solution active est du bichromate acidulé et les électrodes consistent en plaques de charbon et zinc disposées de part et d'autre du tube d'écoulement.

On le voit, le seul avantage de la pile Mauduit relativement aux piles à liquide stable est, outre une manipulation plus simple, la constance de la f. é. m.

Pile Fiorina. — Beaucoup mieux conçue au point de vue de la résistance intérieure est la pile de l'Italien G. Fiorina. Mais elle est à un seul liquide comme la précédente. En outre, le système d'écoulement, se faisant par la partie supérieure, est moins bien compris

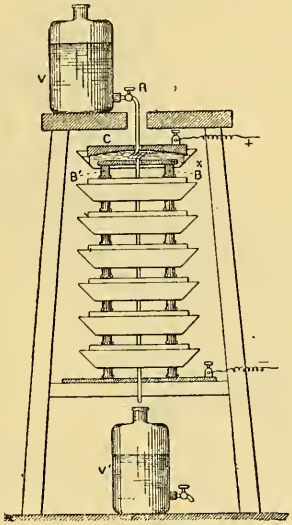


Fig. 41. — Pile Fiorina.

que dans la pile Mauduit, ce qui est d'ailleurs d'assez peu d'importance, les éléments, ici, mesurant à peine quelques centimètres de haut.

La figure 41 représente cette pile, constituée par des cuvettes en porcelaine empilées les unes au-dessus des autres, percées d'un trou central pour le passage du tube de trop-plein, et de quatre autres aux angles de chaque cuvette : par ceux-ci passent des bouchons de cuivre formant vis de calage en même temps que contacts électriques entre le zinc placé au fond de chaque cuvette et le charbon reposant sur des rebords ménagés dans la cuvette inférieure (montage en *tension*, voir chapitre suivant). Le zinc et le charbon de chaque élément sont séparés par une couche assez mince de liquide.

Cette pile est remarquable par le peu d'emplacement qu'elle nécessite et par sa faible résistance intérieure.

Elle tient allumées pendant 4 heures consécutives, avec 12 éléments, 4 lampes de 16 bougies demandant 2,5 ampères chacune et 20 volts : cela représente une puissance utile totale de 200 watts.

La consommation de liquide pour cette expérience est de 20 litres, soit 2,25 kilogrammes de bichromate.

Pile Devaux. — Terminons par un modèle de pile à écoulement qui résume pratiquement de la manière la plus rationnelle tous les avantages que nous avons signalés à l'actif de ces sortes de piles.

Ce modèle, est celui de M. L. Devaux, de Saint-Quentin. Disons

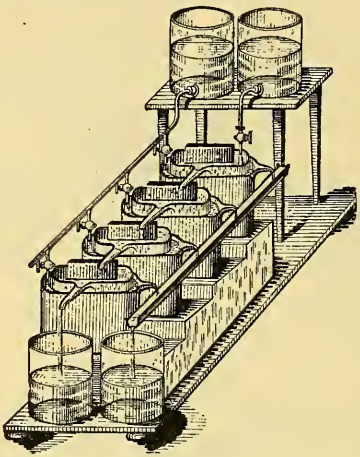


Fig. 42. — Pile Devaux. Les liquides doivent être amenés par des tubes à entonnoir *au fond* des vases.

qu'il n'est pas exploité industriellement et que qui veut l'utiliser doit le construire soi-même.

D'abord, la pile Devaux est à deux liquides. Premier bon point.

Puis les vases extérieurs et intérieurs dont elle se compose sont très aplatis, de manière à réaliser dans le sens de la hauteur la surface voulue des électrodes, tout en réduisant au minimum la contenance des vases. D'où volume encombrant très faible, résistance *idem*. Deuxième bon point.

Ces vases sont l'un en verre, l'autre en terre poreuse, munis à leur partie supérieure de becs pour l'écoulement des liquides.

De plus, l'auteur s'est dit que, pour que les différents éléments soient dans les mêmes conditions, il faut que le liquide excitateur attaque avec la même énergie les électrodes solubles des divers éléments. Ah! très bien. Cette considération, il est vrai, nos précédents inventeurs, faute de savoir comment y remédier, la tenaient pour négligeable, mais ne vous y trompez pas : *certain renard gascon* en

eût dit tout autant... Mais, si désirable soit-il, ce résultat n'est possible que si l'on ne fait pas traverser successivement à ce liquide excitateur tous les éléments de la batterie, parce qu'il arriverait alors épuisé aux derniers.

Il faut donc que chaque vase extérieur renfermant l'électrode soluble reçoive *séparément* sa part de liquide neuf, qu'un distributeur convenable y fait arriver continuellement, tandis que le liquide épuisé est directement conduit à l'égout après avoir léché l'électrode soluble depuis la *partie inférieure*, où l'amène par un tube le distributeur jusqu'à la partie supérieure, où il rencontre le bec de déversement du vase poreux.

Les grincheux vont objecter à cela que le liquide ainsi jeté à l'égout est très incomplètement épuisé, que c'est là du gaspillage, etc. Écoutez ce que M. Devaux répond aux grincheux, avec la plus entière logique :

Ce n'est pas le liquide excitateur — simple solution d'acide chlorhydrique — qui coûte cher.

Le produit coûteux, celui que, par suite, on a intérêt à épuiser jusqu'à l'extrême limite, c'est le liquide dépolarisant.

Or, l'expérience prouve précisément que si l'épuisement du liquide excitateur est très préjudiciable à la constance d'une pile, on peut, au contraire, aller sans beaucoup d'inconvénient jusqu'à l'utilisation presque intégrale du dépolarisant.

D'où cette conclusion que, s'il est naturel de donner à chaque élément sa ration séparée de liquide excitateur, il est non moins naturel de faire parcourir au dépolarisant successivement tous les éléments de la batterie, qui, dès lors, doivent être disposés *en cascade*.

Sans doute cette double circulation complique-t-elle un peu la pile, mais, au moins, on a par compensation l'avantage d'être d'accord avec la logique : c'est assez rare pour mériter d'être pris en considération.

Le seul reproche à adresser à la pile Devaux — quoi donc est parfait en ce monde ? — c'est que l'évacuation des liquides se fait par la partie supérieure ; mais il faut ajouter qu'avec ces minuscules éléments, la circulation est assez active pour que la séparation des liquides par ordre de densités n'ait pas le temps de se faire.

Les liquides recommandés par M. Devaux pour le bon fonctionnement de sa pile répondent à la formule suivante, quelque peu alambiquée à ce qu'il semble :

DÉPOLARISANT

Eau	100 litres
Bichromate de soude	5 kg
Alun	2,5 ·
Sel de cuisine	2,5 —
Sulfate de fer	2,5
Acide sulfurique	15

EXCITATEUR

Eau	30 litres
Acide chlorhydrique	1 —
Sel de cuisine	1 kg

Avec une batterie de 10 éléments de 18 centimètres de haut et de 7 centimètres de large, l'inventeur alimente pendant un temps indéfini une lampe de 20 volts et 16 bougies, ce qui suppose une puissance utile de 50 watts. En mettant un peu de mercure au fond de chaque élément, on peut laisser indéfiniment la pile sous pression, à la seule condition d'arrêter l'écoulement dans les périodes de repos.

CHAPITRE SEPTIÈME

COUPLAGE DES PILES ET DES RÉSISTANCES

Nous allons maintenant aborder une question qui présente en pratique une importance capitale.

Voici, côte à côte, plusieurs éléments.

Nous sentons bien qu'en les réunissant, qu'en totalisant leurs efforts, nous pourrons obtenir des effets plus puissants qu'avec un seul ; il n'y a pas qu'en Belgique que l'union fait la force, et ce doit être le cas ici aussi bien qu'ailleurs.

Mais du diable si nous savons comment nous y prendre pour utiliser à la fois tous nos éléments !

Heureusement, ce n'est pas aussi difficile que cela en a l'air.

Le problème à résoudre est, en somme, le suivant :

Voici une résistance, une lampe à incandescence, par exemple, qu'il s'agit de porter à l'incandescence ; nous la relions aux deux pôles de l'un de nos éléments : rien ! Nous appelons à notre secours un deuxième élément : Comment nous y prendre pour que cet élément ajoute son effet à l'autre et porte à l'incandescence notre filament ? Comment, si ce second élément n'est pas encore suffisant, en ajouter un troisième, et ainsi de suite ?

Traduisons ceci hydrauliquement.

Le conducteur à faire traverser par un courant devient ici le tuyau T (*fig.* 43). Les sources dont nous disposons à cet effet, ce sont les vases A, B, C..., pouvant mettre en jeu des différences de niveau individuelles assez petites ; la *résistance intérieure* de ces sources est représentée par le frottement dans les tuyaux *t*, *t'*...

Ici, nous nous rendons très facilement compte que nous avons deux moyens de faire concourir nos différents vases à l'effet désiré : ou bien nous pouvons les superposer (*fig.* 43), de manière que le liquide de T soit soumis à une pression totale déterminée par la somme de toutes les diff. de niveau, ce qui tend à le faire circuler plus fort que si un seul vase agissait; ou bien nous pouvons placer nos vases côte à côte (*fig.* 44), car alors le tube reçoit *à la fois* du liquide de chacun de nos vases, ce qui tend encore, comme on le comprendra tout à l'heure, à augmenter le débit.

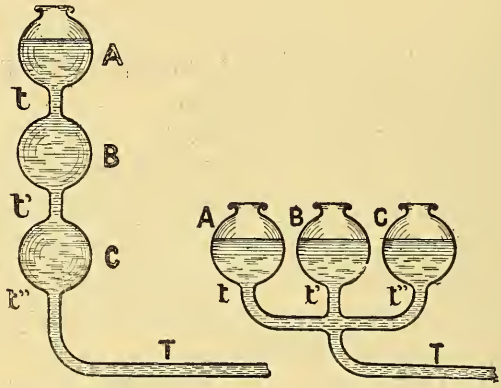


Fig. 43. Fig. 44.

Fig. 43 et 44. — Deux manières de faire concourir les vases A, B, C à l'alimentation de T : couplage en tension, couplage en quantité.

Dans le premier cas (*fig.* 43), nos vases sont dits couplés *en série* ou *en tension;* dans le second, ils sont dits couplés *en quantité* ou *en dérivation.*

Ces deux modes de couplage se retrouvent identiquement lorsqu'il s'agit de réunir entre eux des éléments de pile.

Parlons du premier mode d'abord, celui qui consistait à échafauder les unes sur les autres nos différences de niveau partielles.

Vous avez vu qu'il nous suffisait pour cela de relier le niveau supérieur de chaque système au niveau inférieur du système suivant (*fig.* 43). Or, électriquement parlant, l'électrode positive est le niveau supérieur, l'électrode négative, le niveau inférieur d'une pile. Nous allons donc, comme l'indique la figure 45

relier par un conducteur le pôle + de l'élément 1 avec le pôle — de l'élément 2, puis le pôle + de celui-ci avec le pôle — de l'élément 3, et ainsi de suite. Finalement, tous nos éléments ainsi *couplés*, il existe entre les fils *f* et *f'*, entre le pôle — du premier élément et le pôle + du dernier, comme tout à l'heure entre le haut et le bas de notre échafaudage de réservoirs, une diff. de niveau électrique totale égale à la *somme* des f. é. m. individuelles de tous nos éléments.

En doutez-vous ?

En ce cas, puisque l'analogie hydraulique ne vous suffit pas, raisonnons un peu :

Nous avons commencé, avons-nous dit, par relier le charbon

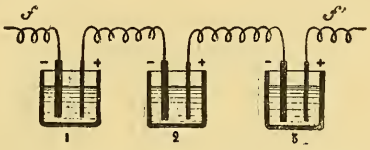


Fig. 45. — Couplage des piles en tension.

de la première pile au zinc de la seconde. Ce faisant, *nous avons amené zinc et charbon au même potentiel.* Vous ne saisissez pas? S'il persistait entre eux la moindre différence de potentiel, il circulerait dans le conducteur qui les réunit un courant, et ceci n'est pas possible, *puisque le circuit n'est pas fermé.* Donc, le zinc de 2 se trouve porté au potentiel E par rapport au zinc de 1.

Mais l'action chimique ayant pour effet de créer entre le zinc et le charbon de 2 une nouvelle diff. de pot. E, il s'ensuit qu'entre le zinc du premier élément et le charbon du second il existe une diff. de pot. $2E$ égale *à la somme* de deux f. é. m... Réunissons ce charbon de 2 au zinc de 3. Pour la même raison, nous aurons entre les électrodes extrêmes une f. é. m. totale égale à $3E$, et ainsi de suite.

Nous voyons donc que si nous couplons en tension un nombre quelconque d'éléments, la f. é. m. qui agira entre le zinc du premier élément et le charbon du dernier sera égale à la somme de toutes les f. é. m. partielles. Si nous réunissons ces pôles par un système conducteur, le courant qui s'établira

sera dû à cette f. é. m. totale, mais nous voyons aussi qu'il aura à vaincre, en plus de la résistance du conducteur, la somme de toutes les résistances intérieures des piles, puisqu'il devra les traverser les unes après les autres.

On peut donc dire qu'en couplant plusieurs éléments en tension, la *batterie* obtenue est équivalente à *une pile unique* qui aurait comme f. é. m. *la somme de toutes les f. é. m.* partielles et comme résistance intérieure *la somme de toutes les résistances intérieures.*

Exemple : 10 éléments de 2 volts et 0,3 ohm couplés en tension équivalent à une pile unique qui aurait 20 volts et 3 ohms.

Et le couplage en quantité?

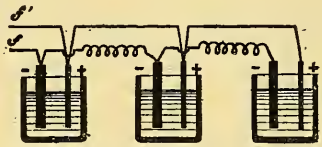


Fig. 46. — Couplage des piles en quantité.

Dans l'analyse hydraulique (*fig.* 44), il suffit de mettre les niveaux correspondants des différentes sources en relation entre eux et avec le tuyau. Cela revient (*fig.* 46) à relier entre eux tous les pôles + d'une part, tous les pôles — d'autre part, et à réunir par le circuit à alimenter les deux pôles communs.

Mais quels sont les avantages de ce mode de couplage?

Effectivement, il faut y regarder à deux fois, car ils n'apparaissent pas aussi clairement que ceux du couplage en tension : ici, la batterie tout entière ne possède pas une f. é. m. plus élevée qu'un seul élément, puisque nous n'avons fait que relier entre eux des points respectivement au même niveau électrique.

Pourtant, nous nous rendons encore assez facilement compte que, s'il s'agit de fournir un certain débit sur un circuit extérieur, chaque élément n'a à fournir séparément qu'une partie de ce débit, de même que chacun des vases de la figure 44 : en conséquence, à débit total égal, l'usure des produits dans chaque élément sera moindre, et le débit total pourra être maintenu plus longtemps.

Mais il ne s'agit pas d'économiser nos produits, il s'agit d'obtenir un effet plus intense. Eh bien! à cet égard aussi, le montage en quantité est justifié et voici de quelle façon :

Comme nous venons de le faire remarquer, si notre batterie doit alimenter un conducteur, chaque élément n'a à fournir qu'une partie du débit total, par exemple le quart, s'il y a quatre éléments couplés. Dans ces conditions, la perte en frottement dans les piles est beaucoup moins grande que si une seule devait fournir le débit total; donc la diff. de pot. aux bornes est plus grande et notre conducteur est traversé par une intensité plus grande : C. Q. F. D., suivant la locution consacrée.

Cela est facile à représenter par quelques formules.

Soit I le débit à fournir par n éléments identiques couplés en quantité.

Chacun n'a à fournir que $\frac{I}{n}$. Donc la perte de potentiel dans les éléments (Voir p. 68), n est que $r\frac{I}{n}$, en appelant r la rés. int., au lieu que, si un élément travaillait seul pour fournir I, la perte serait rI. Ainsi dans le cas de la batterie, la perte de potentiel est n fois plus petite, c'est-à-dire que cette batterie se comporte comme un élément de pile unique dont la résistance intérieure serait n fois plus petite.

Donc, lorsque n éléments sont couplés en quantité, la batterie obtenue est équivalente à une pile unique *dont la f. é. m. serait celle d'un seul élément*, mais la résistance intérieure n *fois plus petite*.

On peut remarquer que, dans un montage en tension, les volts de tous les éléments s'ajoutent, tandis que, dans un montage en quantité, ce sont les ampères fournis par les différents éléments qui s'ajoutent.

CHOIX DU COUPLAGE

Nous sommes maintenant édifiés sur les procédés à employer pour coupler plusieurs éléments et sur les conséquences de ces couplages. Voilà qui est bien.

Mais vous sentez cependant que ceci n'est pas suffisant. Lequel de ces deux modes de couplage emploierons-nous dans tel cas particulier! Voici une lampe à incandescence qu'il s'agit d'alimenter avec ces quelques éléments. Quelle façon de coupler va être *la meilleure?* Vous voilà de nouveau fort embarrassé!

Cela dépend des conditions.

Supposons d'abord que la résistance R que nous voulons alimenter soit très grande relativement à la résistance intérieure r d'un élément. Le problème est analogue à celui qui consiste à envoyer un débit aussi grand que possible dans

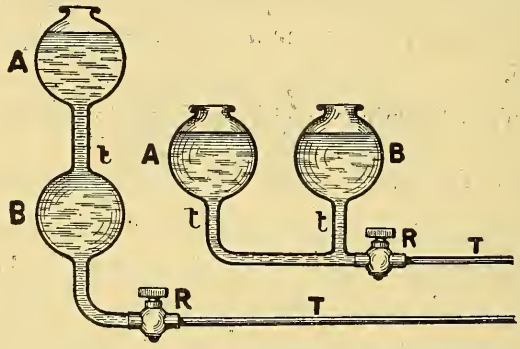


Fig. 47 et 48. — En couplant A et B en quantité, on n'augmente pas beaucoup le débit dans le tuyau *étroit* T, mais on l'augmente en couplant A et B en tension.

un tuyau *long et étroit* T (*fig.* 47 et 48), en l'alimentant par des vases A et B remplis d'eau et dont la résistance intérieure, faible, est représentée par celle des *gros* tuyaux t, t'.

Comment disposerons-nous ces vases?

Remarquons ceci :

Que nous employions un seul vase pour alimenter notre tuyau, ou que nous en employions deux placés au même niveau comme l'indique la figure 48 (montage en quantité), c'est toujours la même différence de niveau qui agit; et, comme les frottements sont à peu près les mêmes dans les deux cas, puisqu'ils sont localisés en T, le débit dans celui-ci n'augmente pas sensiblement.

Donc, inutile de coupler en quantité.

Au contraire, réunissons les deux vases comme l'indique la figure 47 (couplage en tension) : les frottements restent sensiblement les mêmes que dans le cas d'un seul vase, mais la différence de niveau doublant, le débit dans T est notablement augmenté.

On peut tenir un raisonnement analogue pour l'électricité, et on en conclura que, s'il s'agit de faire débiter des piles sur une résistance extérieure *très grande*, nous les couplerons *en tension*, mais *pas en quantité*.

C'est le cas, par exemple, lorsque les piles servent à actionner une sonnerie.

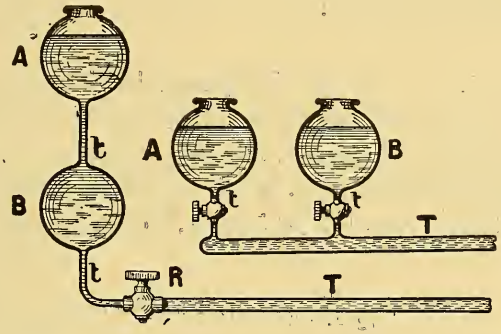


Fig. 49 et 50. — En couplant A et B en tension, on n'augmente pas beaucoup le débit dans le *gros* tuyau, T, mais on l'augmente en couplant A et B en quantité.

Supposons maintenant, au contraire, une résistance extérieure *très faible* par rapport à la résistance intérieure de nos piles.

Hydrauliquement parlant, ceci correspond au cas d'un tuyau *très gros* T (*fig.* 49 et 50), que doivent alimenter des systèmes A et B à *grande* résistance intérieure, *t*, *t'*. Supposons d'abord que T soit alimenté par A seulement (*fig.* 50), le robinet de B étant fermé. On voit que le débit dans T n'est que ce que *t* veut bien laisser passer, puisque presque tout le frottement y est localisé. Donc, si on ajoute B en quantité avec A, en ouvrant son robinet, ce qui s'écoulera de B se joindra sans obstacle à ce qui s'écoulera de A pour traverser T dont la section est très grande. Par ce couplage en quantité, nous augmenterons donc le débit, nous le doublerons presque.

Supposons, au contraire, qu'on réunisse les vases en tension,

comme l'indique la figure 49 : on double bien la différence de niveau, mais on double aussi les frottements, puisqu'ils sont localisés en t' et t ; de sorte que le débit dans T n'augmente pas. Ainsi, au contraire de tout à l'heure, c'est perdre son temps que de coupler en tension, il faut coupler en quantité.

Appliquant ces conclusions à l'électricité, nous nous rappellerons que, lorsque nous aurons à faire débiter le plus possible des piles sur un circuit très *peu résistant* par rapport à leur résistance intérieure, il faudra les coupler *en quantité*, mais *pas en tension.*

Pour vérifier numériquement ces deux règles, appliquons-les à quelques exemples :

Premier cas. — Soit à faire passer le plus grand courant possible à travers un conducteur de 12 ohms à l'aide de 5 piles pour lesquelles $E = 2$ volts, $r = 0{,}3$ ohm.

Montage en tension : f. é. m. de la batterie $= 5 \times 2 = 10$ volts, R intérieure $= 0{,}3 \times 5 = 1{,}5$ ohm ; courant produit

$$\frac{10}{12 + 1{,}5} = 0{,}741 \text{ ampère.}$$

Montage en quantité : f. é. m. de la batterie $= 2$ volts, R int. $= \frac{0{,}3}{5} = 0{,}06$ ohm ; courant produit

$$\frac{2}{12 + 0{,}06} = 0{,}166 \text{ ampère seulement.}$$

Or, avec un élément seul, on aurait un courant de

$$\frac{2}{12 + 0{,}3} = 0{,}163 \text{ ampère;}$$

on voit donc combien, dans ce cas, il est inutile de coupler en quantité et quel intérêt il y a à coupler en tension.

Deuxième cas. — Soit à alimenter un conducteur de 0,05 ohm à l'aide de 4 éléments pour lesquels $E = 1{,}5$ volt et $r = 0{,}4$ ohm.

Montage en quantité : f. é. m. de la batterie = 1,5 volt R int. $= \frac{0,4}{4} = 0,1$ ohm ; courant produit

$$\frac{1,5}{0,1 + 0,05} = 10 \text{ ampères.}$$

Montage en tension : f. é. m. de la batterie $= 1,5 \times 4 = 6$ volts, R int. $= 0,4 \times 4 = 1,6$ ohm ; courant produit.

$$I = \frac{6}{1,6 + 0,05} = 3,64 \text{ ampères.}$$

Or, avec un seul élément, on aurait un courant de

$$\frac{1,5}{0,4 + 0,05} = 3,33 \text{ ampères ;}$$

on voit de même combien, dans ce cas, il est inutile de coupler en tension et quel intérêt il y a à coupler en quantité.

Vous voilà donc tiré d'embarras !

Pas tout à fait, pourtant.

Et si ma résistance n'était ni très grande, ni très petite par rapport à la résistance intérieure de chacun de nos éléments, mais, au contraire, en était voisine ?

Il faut vous dire d'abord que, par des considérations dans lesquelles nous n'entrerons pas ici, on démontre qu'on retire le maximum d'effet d'une pile ou d'une batterie sur un conducteur extérieur, on lui fait produire sa *puissance utile maxima* lorsque *la résistance de ce conducteur extérieur* est justement *égale à la résistance intérieure* de la pile ou de la batterie. Plus on s'écarte de cette égalité, dans un sens ou dans l'autre, moins la puissance absorbée dans le conducteur est grande.

Par conséquent, *si l'on veut produire le maximum d'effet* dans un conducteur donné, tel qu'une lampe, par exemple, et qu'on ne possède qu'un certain nombre d'éléments pour arriver à ce résultat, il faudra coupler les éléments de telle façon que la résistance intérieure de la batterie formée soit *aussi voisine que possible* de la résistance du conducteur extérieur.

C'est bien cela que nous faisons lorsque, ayant à débiter sur une *grande résistance*, nous couplons *en tension*, car, ajoutant toutes les résistances intérieures, nous nous rapprochons, autant que possible, de la résistance extérieure.

C'est encore ce que nous faisons lorsque, ayant à débiter sur une *résistance très faible*, nous couplons *en quantité*, car nous diminuons ainsi la résistance intérieure et la rapprochons, par suite, de celle du conducteur extérieur.

Mais j'en reviens à notre cas embarrassant de tout à l'heure, et je suppose que j'aie à coupler une dizaine d'éléments, dans les conditions de maximum d'effet, sur une résistance extérieure R peu différente de la résistance interne r d'un de nos éléments.

Supposons, par exemple, R un peu plus grand que r. Pour obéir à la règle du premier cas, nous couplons nos 10 éléments en tension ; or, la résistance de la batterie, soit $10r$, est maintenant bien supérieure à R ; nous avons donc dépassé le but et nous n'obtenons pas, par suite, le maximum d'effet de nos 10 éléments.

Je suppose, au contraire, que R soit un peu plus petit que r.

Si nous couplons en quantité, nous obtenons une batterie dont la résistance intérieure $\frac{r}{10}$ est devenue beaucoup plus petite que R. Là encore nous avons dépassé le but.

Dans un cas comme dans l'autre, pourtant, nous sentons bien qu'il doit y avoir moyen d'utiliser nos dix éléments avec plus de profit qu'un seul. Et, en effet, il suffit de recourir à un couplage *mixte* en quantité et en tension.

Voici, par exemple, 6 éléments.

Groupés en tension, ils nous fournissent une batterie (*fig.* 51, *a*) dont la f. é. m. est $6E$, la rés. int. $6r$.

Formons-en maintenant deux groupes de 3 en tension : chacun de ces groupes étant équivalent à une pile unique, mais dont les *constantes* sont de $3E$ et $3r$, nous pouvons les réunir en quantité (*fig.* 51, *b*), ce qui nous donne un *couplage mixte* par 3 éléments en tension et 2 en quantité. Conformément aux principes ordinaires, la f. é. m. de cette batterie est toujours $3E$, mais la rés. int. est $\frac{3r}{2} = 1{,}5r$.

De même, nous pourrons faire 3 groupes de chacun deux éléments en tension et réunir en quantité (*fig.* 51, *c*) : les constantes de ce montage par 2 en tension et 3 en quantité seront $2E$ et $\frac{2r}{3}$ ou $0{,}67r$.

Enfin, nous pourrons coupler les 6 éléments en quantité (*fig.* 51, *d*), ce qui nous donnera comme constantes E et $\frac{r}{6}$ ou $0{,}167r$.

Ces différents modes de couplages fournissent, par conséquent, différentes valeurs pour la résistance intérieure de la

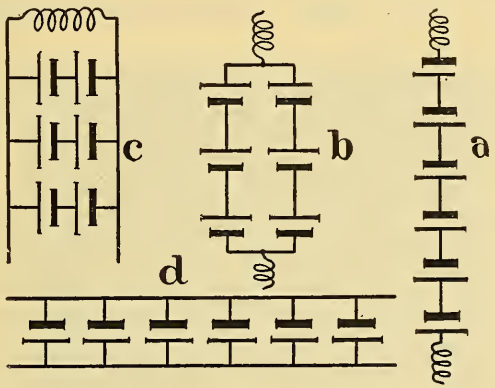


Fig. 51. — Différents couplages possibles de 6 éléments.

batterie obtenue : lorsqu'il s'agira de faire passer le plus grand courant possible dans une résistance donnée, on cherchera, dans toutes ces valeurs possibles de la résistance intérieure, *la plus voisine* de la résistance extérieure, et on prendra le mode de couplage correspondant.

Prenons un exemple : Faisons $r = 0{,}2$ ohm et f. é. m. = 2 volts dans le cas précédent.

Ceci nous donne 4 valeurs possibles pour la rés. int. de la batterie suivant le couplage : $6r = 1{,}2$ ohm ; $1{,}5r = 0{,}3$ ohm ; $0{,}67r = 0{,}134$ ohm, enfin $0{,}167r = 0{,}0334$ ohm. Supposons qu'il s'agisse d'alimenter un conducteur $R = 0{,}25$ ohm. Nous prendrons alors le mode de couplage fournissant 0,3 ohm, soit 3 éléments en tension et 2 en quantité. Et, en effet, nous

débiterons dans ce cas $\frac{6}{0,3 + 0,25} = 10,9$ ampères, alors que nous ne débiterions respectivement que 8,28, 10,4 ou 7,1 ampères avec les trois autres modes de couplage.

Avant de clore ce chapitre du couplage des piles, faisons remarquer que, lorsqu'une pile ou une batterie débite dans les conditions de puissance utile *maxima*, c'est-à-dire sur une résistance extérieure égale à la sienne, la puissance perdue dans la pile est évidemment égale à la puissance utile, c'est-à-dire que le rendement est égal à $\frac{1}{2}$ ou 50 0/0. Évidemment aussi, la diff. de pot. aux bornes est alors égale à $\frac{E}{2}$.

Comme le rendement est très mauvais dans de telles conditions, il vaut bien mieux, chaque fois qu'on le peut, ne pas faire produire à la pile sa puissance utile maxima et se contenter d'un débit notablement *plus faible*.

Enfin, il suffira au lecteur de se reporter aux analogies hydrauliques, figures 43 et 44, pour se rendre compte que, s'il n'y a pas grand inconvénient à coupler en tension des piles de f. é. m. différentes, on ne peut, au contraire, les coupler en quantité, parce que, loin de débiter dans le circuit extérieur, les piles à niveau électrique inférieur pourraient recevoir une partie du courant fourni par celles à f. é. m. supérieure.

INFLUENCE DE LA TENSION SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

En mettant à profit les principes précédents, l'inventeur des accumulateurs, Gaston Planté, a pu prouver que l'abîme qu'on supposait séparer l'électricité fournie par les piles, ou électricité *dynamique*, de celle fournie par les machines à frottement, ou électricité *statique*, n'était même pas un fossé : c'est seulement la différence des tensions qui produit la différence des effets, et, à l'aide de couplages convenables, on peut passer aisément de l'une à l'autre « sorte » d'électricité.

Planté a imaginé, à cet effet, un appareil fort ingénieux, le

coupleur rhéostatique : cet appareil permet de coupler d'un seul coup en tension tous les éléments d'une batterie comportant plusieurs milliers de petits accumulateurs qui, groupés en quantité pour la charge (p. 146), peuvent être chargés par une source de faible tension, mais de grand débit (*fig.* 52).

La différence de potentiel aux bornes atteignant plusieurs milliers de volts lors du couplage en tension, la batterie devient capable de produire tous les effets attribués autrefois aux seules machines statiques : étincelles violentes rappelant les éclairs, aigrettes, production de boules de feu analogues aux éclairs en boules, etc. Gaston Planté a trouvé là l'occasion d'une des plus belles études dont l'électricité ait été l'objet.

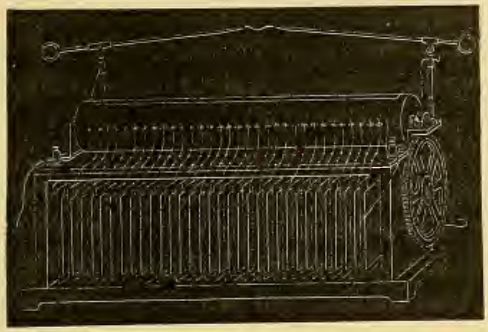


Fig. 52. — Coupleur rhéostatique de Planté.

A propos de cette faculté de faire varier les effets de l'électricité par des couplages appropriés, disons encore en passant que, pour que les courants électriques soient dangereux pour la vie humaine, il faut généralement qu'ils soient *intenses* — et que pour cela ils soient produits par une source de *haute tension*, car c'est à cette seule condition que des courants quelque peu intenses peuvent circuler à travers le corps humain, dont la résistance est grande.

Mais il ne suffit pas que le potentiel soit élevé, il faut encore que la source puisse maintenir le courant intense qui doit en résulter. C'est pour cela que les différences de potentiel de quelques milliers de volts des installations dites à *haute tension* sont *mortelles* en cas de contact prolongé, parce que de

ce contact résulte le passage à travers le corps de courants pouvant atteindre plusieurs ampères.

C'est pour cela aussi que les courants produits par les petites machines statiques, quoique mettant en jeu des tensions de plusieurs dizaines de mille volts (p. 25), sont peu dangereux, parce que la résistance intérieure de ces machines étant énorme, il n'en peut résulter que des courants absolument infimes.

Pourtant, certains courants, dits à *haute fréquence*, présentent pour le corps humain une innocuité déconcertante, sur laquelle nous aurons à revenir.

Sauf cette exception, les courants électriques à haute dose sont plutôt désagréables à l'organisme humain : c'est là un fait dont les assassins américains pourraient témoigner en toute compétence, si l'*électrocution* leur laissait des loisirs. Mais que dire de la sensibilité du cheval, une des robustes bêtes de la création pourtant, que 10 malheureux volts suffisent pour mettre par terre !

Or, c'est bien plus de 19 volts que le cheval parisien rencontre parfois sous son sabot, depuis que d'entreprenantes Compagnies de traction ont parsemé le sol de la capitale de certains blocs métalliques dont la réputation n'est plus à faire. Et c'est lui, trop souvent, qui paie les *plots* cassés !

COUPLAGE DES RÉSISTANCES

Arrivons à une question qui revient à peu près aussi souvent que celle du couplage des piles, celle du couplage des résistances.

Quelle est la résistance de l'ensemble d'un circuit constitué par plusieurs conducteurs différents ?

Supposons d'abord ces conducteurs branchés *en série*, à la suite les uns des autres. Dans ce cas, pas de doute. Le courant ayant à traverser successivement ces différents conducteurs, éprouve une résistance *totale* R qui est égale à la *somme* de toutes les résistances partielles :

$$R = r_1 + r_2 + r_3 \ldots$$

Le courant qui parcourt ce circuit sous une diff. de pot. e est donc

$$I = \frac{e}{R} = \frac{e}{r_1 + r_2 + r_3 \ldots}.$$

Par exemple, si $e = 10$ volts et $r_1 = 2$ ohms, $r_2 = 4$, $r_3 = 8$, $r_4 = 6$, on aura $I = \frac{10}{20} = 0{,}5$ ampère; on voit qu'on absorbera dans la première une partie $r_1 I = 2 \times 0{,}5 = 1$ volt de la diff. de pot. employée, dans la seconde $4 \times 0{,}5 = 2$ volts, etc.

Supposons maintenant que deux conducteurs différents r_1 et r_2 sont placés en *quantité*, en *dérivation* l'un par rapport à l'autre (*fig.* 53); la chose devient plus délicate.

Pourtant, vous vous rendez bien compte que le courant,

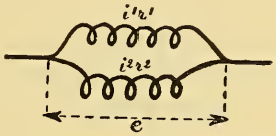


Fig. 53. — Circuit formé par deux résistances en dérivation.

ayant entre les deux points de jonction deux chemins à la fois pour passer, r_1 et r_2, passera *plus aisément* que s'il n'en avait qu'un. Son intensité s'en trouvera donc augmentée, de sorte que l'ensemble des deux conducteurs r_1 et r_2 équivaut à un conducteur *unique* dont la résistance serait moindre que r_1 ou que r_2 et s'appelle pour cette raison *résistance réduite*. Mais on ne se paie pas de mots en électricité : dire que cette résistance est plus petite est passablement vague; il est utile de voir exactement quelle en est la valeur.

Voyons :

Supposez que le système $r_1 r_2$ soit soumis à une certaine diff. de pot. e. Sous cette influence, il passe dans r_1 un courant $i_1 = \frac{e}{r_1}$ et dans r_2 un autre courant $i_2 = \frac{e}{r_2}$. Notre conducteur idéal unique, pour être équivalent à notre système, devrait donc être parcouru par un courant

$$I = i_1 + i_2 = \frac{e}{r_1} + \frac{e}{r_2} = e\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right).$$

c'est-à-dire en appliquant les principes arithmétiques connus de l'addition des fractions :

$$I = \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1 \times r_2}\right) e.$$

Que signifie ceci ? En l'écrivant sous la forme ordinaire de la loi de Ohm,

$$I = \frac{e}{\left(\frac{r_1 \times r_2}{r_1 + r_2}\right)}.$$

on voit que cela signifie tout simplement que le conducteur idéal équivalent à notre système de deux conducteurs, a

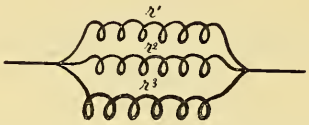


Fig. 54. — Circuit formé par trois résistances en dérivation.

comme résistance $\frac{r_1 \times r_2}{r_1 + r_2}$. C'est la résistance réduite cherchée, qui est par conséquent égale au produit des deux résistances divisé par leur somme.

Exemple : Si $r_1 = 4$ ohms, $r_2 = 2$ ohms, on aura R réduite $= \frac{4 \times 2}{4 + 2} = 1{,}33$ ohm, valeur moindre que la plus petite des deux résistances.

Supposons maintenant qu'en dérivation sur r_1 et r_2 nous placions une troisième résistance r_3 (*fig.* 54). Nous diminuons encore la résistance entre les deux points de jonction, puisque nous ouvrons au courant un troisième chemin. Pour calculer la nouvelle résistance réduite, vous supposerez que les deux premières r_1 et r_2 n'en fassent qu'une, dont vous calculerez la R réduite comme il a été dit. Soit R cette résistance réduite : vous agirez de la même façon sur R et r_3.

En appliquant ce mode de calcul, on voit entre autres choses intéressantes que, si on branche en dérivation entre

les deux mêmes points n conducteurs identiques, la résistance réduite entre ces deux points est $\frac{r}{n}$. Vous vous rappelez (Voir p. 91) que c'est la formule trouvée tout à l'heure pour la résistance d'une batterie de piles identiques couplées en quantité, qui ne sont en effet, au point de vue de la résistance, que des résistances égales montées en dérivation entre les deux pôles communs.

RÉSUMÉ

On couple *en tension* ou *en série* plusieurs éléments en reliant le pôle — de chacun au pôle + du suivant. La f. é. m. de la *batterie* obtenue est égale à la somme des f. é. m. de tous les éléments et sa résistance intérieure à la somme des résistances intérieures. On couple ces éléments *en quantité* ou *en dérivation* ou *en parallèle* en reliant entre eux les pôles de même nom. La f. é. m. de la batterie n'est égale dans ce cas qu'à celle d'un seul élément, mais sa résistance intérieure est n fois plus petite s'il y a n éléments. On peut aussi réaliser des couplages *mixtes* en formant des groupes égaux de plusieurs éléments en tension et réunissant ces groupes en quantité.

Pour retirer d'un certain nombre d'éléments de pile une puissance utile aussi grande que possible :

1° Si on doit faire débiter sur une très grande résistance, on les couplera en tension ;

2° Si, au contraire, la résistance à alimenter est très petite, on couplera en quantité ;

3° Si, enfin, la résistance à alimenter est voisine de la résistance intérieure de chaque élément, on choisira le couplage mixte dont la résistance intérieure sera *la plus voisine* de la résistance extérieure.

Si on veut faire travailler des éléments de pile dans de bonnes conditions de *rendement*, on aura, au contraire, intérêt à s'écarter des conditions précédentes et à ne demander à la batterie qu'un débit plus faible.

Lorsque plusieurs conducteurs sont montés en série, la résistance de l'ensemble du circuit est égale à la somme de toutes les résistances partielles. Si deux résistances sont montées en dérivation entre deux points, la *résistance réduite* équivalente à leur ensemble a pour valeur le quotient de leur produit par leur somme.

CHAPITRE HUITIÈME

PRINCIPE DES INSTRUMENTS DE MESURE

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES

Action des bobines de fil sur l'aiguille aimantée. — Une étude urgente nous réclame maintenant.

Nos lecteurs n'ont eu jusqu'à présent à leur disposition, pour contrôler nos assertions, que... les yeux de la foi.

C'est plutôt maigre.

Ces instruments de mesure très commodes, mais par trop élastiques, dont force leur a été de se contenter jusqu'à présent, il est temps que nous voyions à les remplacer par d'autres moins extra-scientifiques et susceptibles de nous fournir des renseignements moins... gratuits.

Aussi bien, le niveau de nos connaissances nous permet-il maintenant d'aborder cette étude, ou tout au moins de concevoir la possibilité d'appareils de ce genre.

La base sur laquelle repose le principe de nos futurs auxiliaires est l'action déjà signalée que le courant exerce sur l'aiguille aimantée.

On ne manque jamais, dans les cours, de parler, au sujet de cette action, de certain petit bonhomme imaginaire dont Ampère recommandait l'emploi pour prévoir dans tous les cas le sens de la déviation : Supposez ledit petit observateur (*fig.* 55) couché tout de son long suivant le fil conducteur, de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête — pauvre bonhomme! *Toujours*, si de son

intéressante position il contemple l'aiguille, il verra le pôle nord de cette aiguille — celui qui regarde le pôle nord de la terre — dévié *vers sa gauche*.

Or, c'est à ce petit bonhomme d'Ampère que nous allons faire supporter tout le poids de la théorie des instruments de mesure.

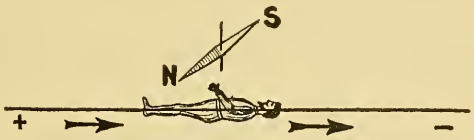


Fig. 55. — Bonhomme d'Ampère.

Imaginons que le fil perturbateur, au lieu de passer purement et simplement dans la direction nord-sud, au-dessous de l'aiguille aimantée, se replie de manière à l'entourer (*fig.* 56) Soit que vous imaginiez le bonhomme d'Ampère couché dans la première partie du fil, sous l'aiguille, soit que vous le supposiez couché au-dessus de l'aiguille, toujours la regardant

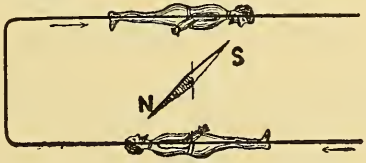


Fig. 56. — Amplification de l'action du courant sur l'aiguille aimantée

et le courant lui entrant par les talons, vous vous rendez compte, en appliquant la règle précédente, que *toujours* il verra le pôle nord dévié du même côté. Autrement dit, le courant qui circule dans le fil au-dessus de l'aiguille agit dans le même sens que celui qui circule au-dessous. Ces deux effets s'ajoutent donc, et la déviation de l'aiguille doit être plus grande que lorsque le fil ne la contournait pas.

C'est ce qu'on observe en effet.

Le résultat est trop encourageant pour que nous nous arrêtions en si beau chemin.

Continuons donc à entourer notre aiguille et faisons faire au

fil un second tour : Plaçons par la pensée notre sympathique bonhomme en une position quelconque du circuit ; il nous indique toujours une action de même sens. Les actions partielles de toutes les portions du fil sont donc concourantes et produisent une déviation de plus en plus accentuée. Et plus nous augmenterons le nombre des tours, plus l'action du circuit sur l'aiguille aimantée deviendra énergique, de sorte qu'alors un courant extrêmement peu intense pourra être décelé, provoquer même une déviation très forte si le nombre de tours est très grand.

Pour vous donner une idée du parti qu'on a su tirer de ce fait, disons qu'on embobine souvent sur des appareils semblables jusqu'à 50.000 tours de fil !

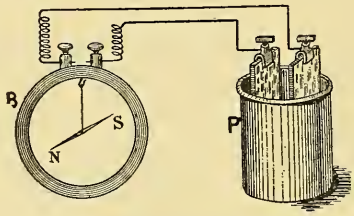


Fig. 57. — Galvanomètre simple.

Tel est le secret du rôle capital des bobines de fil en électricité.

Ici, la vérification de nos affirmations est aisée.

Vous n'avez qu'à enrouler de 20 ou 30 tours (*fig.* 57), sur une bobine B de 5 ou 6 centimètres de diamètre intérieur, un fil de cuivre recouvert de coton *isolé*, pour éviter les court-circuits et forcer le courant à circuler dans toute la longueur du fil. A l'aide d'un fil de soie, vous suspendez horizontalement à l'intérieur de cet anneau, orienté du nord au sud et placé verticalement, une aiguille aimantée ; puis vous faites passer le courant d'une pile : pfutt! l'aiguille est énergiquement déviée, beaucoup plus que si votre fil, parcouru par le même courant, mais *déroulé*, était approché même très près de l'aiguille.

Vous comprenez donc pourquoi on a donné à ces appareils à bobines et à aiguille aimantée le nom de *multiplicateurs :* ils multiplient l'action du courant.

On les appelle aujourd'hui des *galvanomètres*, parce qu'ils servent à *mesurer* l'intensité des courants *galvaniques* — de Galvani, contradicteur de Volta dans une dispute célèbre à propos de... grenouilles, et cause involontaire de la découverte de la pile.

Et vous allez voir que rien n'est plus simple que cette mesure.

Ampèremètres. — Un courant déterminé traversant la bobine d'un galvanomètre donné provoque une déviation de l'aiguille bien déterminée, fixe et constante si le courant reste lui-même invariable. Si, au contraire, cette intensité augmente, la déviation augmente aussi et inversement. Ainsi, dans un gal-

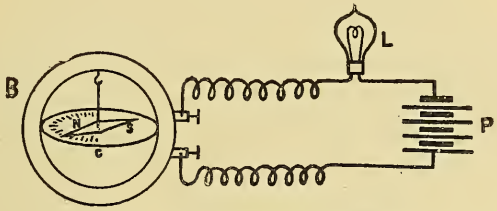


Fig. 58. — Principe de l'ampèremètre.

vanomètre donné, à chaque valeur de la déviation de l'aiguille correspond une valeur bien déterminée de l'intensité du courant. Par exemple, un courant de 1 ampère fera dévier l'aiguille de 10°, un courant de 2 ampères la fera dévier de 19°, etc.

Rien ne nous empêche, dès lors, de mettre au-dessous de l'aiguille (*fig.* 58) un cadran C avec des points de repère pour indiquer la déviation qui correspond à 1 ampère, 2 ampères, etc., en procédant par comparaison avec un appareil type, un *étalon* soumis au même courant. Si maintenant nous lançons dans notre appareil un courant inconnu, son intensité sera précisément mesurée par la déviation de l'aiguille. Si cette aiguille s'arrête par exemple à mi-distance entre le trait marqué 5 ampères et celui marqué 6, nous en conclurons que l'intensité cherchée est de 5 ampères et demi.

Notre galvanomètre, dans ce cas, s'appelle un *ampèremètre*.

Vous voyez donc comment nous ferons désormais pour mesurer le courant traversant un circuit : nous forcerons ce

courant à traverser également notre galvanomètre en *intercalant* ce galvanomètre dans le circuit, et nous lirons sur le cadran l'intensité, comme on lit la pression sur le cadran d'un manomètre. Seulement, pour ne pas troubler le régime du circuit par l'intrus que nous y introduisons, nous aurons eu soin de faire *très faible* sa résistance, en le constituant par quelques tours de gros fil.

Voltmètres. — Changeons maintenant notre fusil d'épaule et, avec notre galvanomètre, essayons de mesurer des volts.

Commençons, pour cela, par enlever le *cadre* de gros fil que nous y avons placé pour la mesure des intensités, et substituons-y un autre cadre comprenant un grand nombre de tours de fil très fin, présentant une grande résistance.

Nous ne pourrons naturellement plus faire passer dans ce fil qu'un courant très faible; mais, comme ce courant circulera beaucoup de fois autour de l'aiguille, il produira en définitive tout autant d'action que le courant intense de tout à l'heure. Ce qui agit sur l'aiguille, vous le concevez, c'est le nombre d'*ampères-tours* de la bobine; que ce nombre d'ampères-tours soit obtenu par un grand nombre d'ampères agissant un petit nombre de fois, ou qu'il résulte d'une petite fraction d'ampère multipliée par un très grand nombre de tours, peu importe, le résultat est le même.

Cela dit, faisons agir aux bornes de notre galvanomètre à fil fin une certaine diff. de pot. Un courant prend naissance dans le fil, qui fait dévier l'aiguille suivant son intensité.

Mais la valeur de ce courant dépend de celle de la diff. de pot. et ne dépend même que de cela, puisque la résistance du fil du galvanomètre est toujours la même.

Donc, en définitive, la déviation dépendra de la diff. de pot., de sorte qu'à chaque diff. de pot. agissante correspondra une déviation déterminée.

Ainsi, une diff. de pot. de 1 volt produira une déviation de 5°, tandis que 2 volts provoqueront une déviation de 9°, que 3 volts donneront 12°, etc.

Par conséquent, nous pourrons fixer sous notre aiguille un cadran sur lequel nous marquerons des points de repère pour

indiquer la déviation correspondant à 1 volt, celle correspondant à 2 volts, etc. Ceci fait, si nous plaçons notre appareil aux bornes d'une source de f. é. m. ou d'une diff. de pot. inconnue et que notre aiguille s'arrête sur le trait correspondant à 6 volts, nous en concluons que la diff. de pot. mesurée est de 6 volts.

On saisit la différence entre les deux sortes d'appareils dont nous venons de parler :

Dans l'ampèremètre, c'était le courant à mesurer lui-même qui agissait directement sur l'aiguille pour la faire dévier.

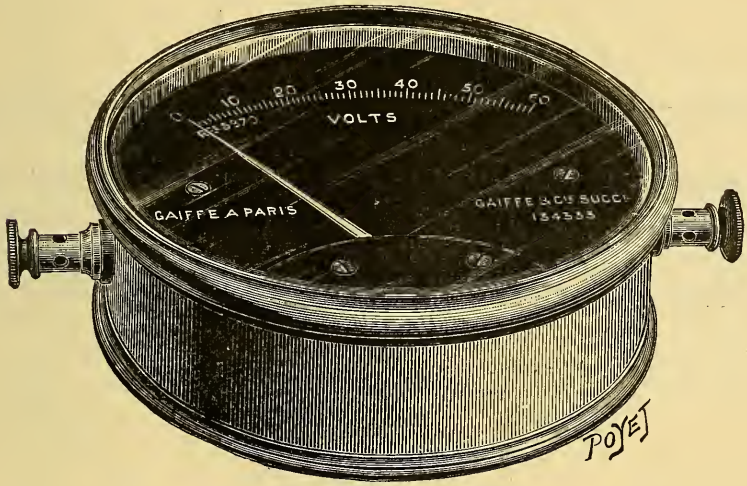


Fig. 59. — Voltmètre industriel.

Dans le voltmètre, au contraire, on mesure *indirectement* une diff. de pot. par l'intensité qu'elle produit dans un circuit toujours le même.

Mais, dans l'un et l'autre cas, en réalité, c'est toujours une intensité que l'on mesure, de sorte que voltmètre et ampèremètre doivent présenter un air de famille très accentué.

Au point de vue extérieur, en effet, la seule différence consiste en ce qu'on voit écrit, sur le cadran de l'un, *volts;* sur celui de l'autre, *ampères.* Si vous êtes plus curieux, si vous voulez voir « ce qu'il y a dedans », vous y voyez tout simplement comme différence, dans le cas de l'ampèremètre, un fil

gros et court — dont nous avons expliqué la nécessité — et, dans celui du voltmètre, un fil long et fin.

Pourquoi si fin et si long ce dernier?

Rien de plus simple à comprendre.

Si la résistance intérieure d'un voltmètre n'était pas très

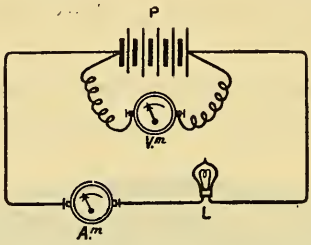


Fig. 60. — Différence entre les modes d'emploi du voltmètre et de l'ampèremètre.

grande, chaque fois qu'on relierait ses deux bornes aux deux points entre lesquels il s'agit de mesurer une diff. de pot., le voltmètre serait parcouru par une intensité assez grande fournie supplémentairement par la source, d'où : 1° perte d'énergie

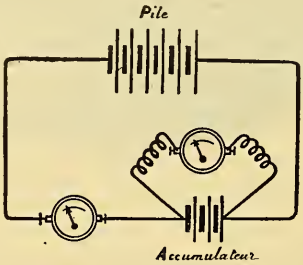


Fig. 61. — Emploi du voltmètre pour mesurer la diff. de pot. entre deux points quelconques d'un circuit.

inutile et même nuisible, car l'appareil chaufferait et pourrait *brûler ;* 2° diminution de la diff. de pot. entre les deux points par suite de l'augmentation de débit réclamée à la source (Voir p. 66). L'appareil, en outre d'une dépense de courant inutile, changerait donc le régime de la pile ou du circuit et ne mesurerait pas ce qu'il doit mesurer.

L'emploi du fil fin et long évite naturellement tous ces incon-

vénients, car la minuscule intensité supplémentaire demandée à la source n'en peut changer le régime, à moins que la complexion de celle-ci soit bien délicate, que sa résistance intérieure soit bien grande.

Il faut vous rappeler en tout cas :

1° Que l'ampèremètre s'intercale *en série* dans le circuit dans lequel il s'agit de mesurer l'intensité (*fig.* 60 et 61);

2° Que le voltmètre, ou bien est relié directement aux deux bornes de la source (*fig.* 60) et mesure, suivant qu'elle débite ou non, la diff. de pot. aux bornes de cette source ou sa f. é. m. ; ou bien se place *en dérivation* entre deux points d'un circuit dont on veut connaître la diff. de pot. (*fig.* 61).

Et remarquez en outre qu'avec ces deux instruments vous pouvez mesurer toutes sortes de grandeurs électriques : par exemple, vous aurez la résistance d'un conducteur en mesurant la diff. de pot. à ses bornes et l'intensité du courant qui y circule et en faisant le quotient des volts par les ampères; ou bien la puissance absorbée dans ce même conducteur en faisant le produit des volts par les ampères, etc. Si les laboratoires ont à leur disposition des appareils de mesure nombreux et compliqués, le voltmètre et l'ampèremètre sont, au contraire, à peu près les seuls que l'électricien praticien a l'occasion de manipuler.

RÉSUMÉ

L'action d'un courant sur l'aiguille aimantée augmente avec son intensité et avec le nombre de fois que ce courant circule autour de l'aiguille. Elle dépend du nombre des *ampères-tours* de la bobine. Tel est le principe des galvanomètres. Dans un galvanomètre donné, un courant produit une déviation d'autant plus grande qu'il est plus intense. Le galvanomètre étant préalablement *étalonné* par comparaison avec un appareil type, on peut donc mesurer l'intensité d'un courant par la grandeur de la déviation qu'il détermine, lue sur le cadran de l'instrument. Si le courant qui circule dans l'appareil est justement celui du circuit qu'on veut mesurer, l'appareil sert d'*ampèremètre*. Il doit avoir alors une faible résistance pour ne pas troubler le régime des circuits dans lesquels on l'intercale. Si, au

contraire, l'intensité est provoquée par une diff. de pot. aux bornes de laquelle on a directement relié le galvanomètre, la déviation, si la graduation est faite en conséquence, donne indirectement la valeur en volts de cette diff. de pot. L'appareil sert alors de *voltmètre* et doit posséder une grande résistance, pour n'exiger de la source qu'un faible supplément de courant.

CHAPITRE NEUVIÈME

ÉCLAIRAGE PAR INCANDESCENCE

LAMPES A INCANDESCENCE

Nous avons franchi sans encombre les parties les plus délicates de notre étude, et vous pouvez à bon droit vous demander quand nous verrons à tirer parti, au point de vue pratique, des connaissances petit à petit acquises.

A cet égard, le champ est encore bien limité.

Nous ne connaissons guère, en fait de phénomènes électriques susceptibles d'applications pratiques, que l'échauffement d'un conducteur, qui poussé à l'extrême, devient l'*incandescence*, mode de production le plus fréquent de la lumière électrique.

Nous allons donc pouvoir utiliser nos connaissances au calcul d'une installation domestique d'éclairage par piles, mais il convient d'abord que nous accordions quelque attention à la manière dont on met à profit dans les lampes électriques ce phénomène de l'incandescence d'un mince filament.

Pour réaliser dans les meilleures conditions par cet intermédiaire la transformation de l'énergie électrique en radiations lumineuses, il faut opérer à température aussi haute que possible : d'où la nécessité de constituer le filament par une matière joignant à une conductibilité suffisante une notoire infusibilité. Dans les premiers temps, on s'adressait au platine, confiant dans le brevet d'infusibilité que lui avaient décerné les chimistes. On n'a pas tardé à constater que les chimistes sont gens de trop facile composition et que pour le courant électrique, cette infusibilité du platine ne pèse pas lourd : quelques volts en moins, la lampe n'éclaire pas; quelques volts en trop, le filament n'existe plus !

La charbon satisfait beaucoup mieux aux conditions requises : c'est lui qui jusqu'à nouvel ordre constitue l'âme de l'immense majorité des lampes électriques.

Le filament de ces lampes est en général obtenu par le *macaronisage* au diamètre voulu d'une pâte convenable, pâte de bois, collodion ou autre, carbonisée ensuite à haute température. Irrégulier et trop tendre, le filament ainsi réalisé est *nourri* par son maintien au rouge à l'aide du courant dans une atmosphère d'hydrocarbures; ceux-ci se décomposent au contact du charbon incandescent et déposent des particules de carbone très dense, de préférence sur les parties les plus maigres, que l'accroissement local de résistance fait rougir plus vivement. Ce nourrissage augmente donc de façon très heureuse la dureté et l'homogénéité des filaments, qui sont ainsi rendus propres à leur rôle.

Mais le charbon est combustible : au contact de l'air, un filament de charbon incandescent disparaîtrait en moins de temps qu'il en faut pour le dire. On tourne la difficulté en l'enfermant dans une

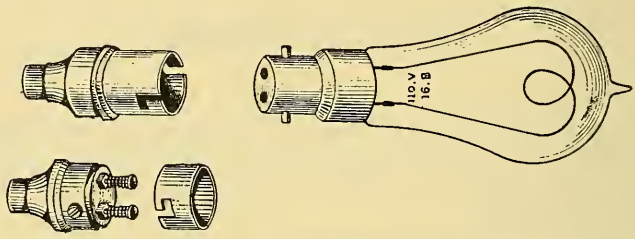


Fig. 62. — Lampe à incandescence et sa douille.

ampoule où règne un vide parfait et d'où il communique avec l'extérieur par deux fils de platine, seul métal susceptible de se souder au verre (*fig.* 62). Ces fils s'attachent à deux contacts métalliques noyés dans le *culot* de la lampe et servent à relier le filament avec la source d'électricité par l'intermédiaire d'une *douille* à baïonnette ou à vis.

Réalisé péniblement au moyen de trompes à mercure agissant de longues heures, le vide, ce *rien* au sens absolu du mot, est presque ce qui coûte le plus dans une lampe à incandescence et c'est plutôt vexant... Or, si vraiment on ne prétendait à son aide se mettre à l'abri que de la seule combustion du filament, pas mal de mes lecteurs souriraient de pitié : pourquoi ne remplirait-on pas tout simplement l'ampoule d'un gaz inerte, d'azote par exemple?

C'est que le vide confère en même temps dans un autre ordre d'idées un avantage énorme. Il donne l'isolement calorifique le plus parfait qu'on connaisse, à la condition d'être poussé jusqu'au degré le plus extrême. Sans lui, la chaleur développée dans le filament se dissiperait trop aisément à l'extérieur, et il faudrait une dépense de courant bien plus grande pour amener le filament à la température requise. Le vide est donc bien décidément une nécessité, et tout ce

que nous pouvons faire, c'est de nous demander si on ne pourrait pas l'obtenir à moins grands frais.

Or les travaux actuels sur les très basses températures paraissent fournir à cette demande une réponse affirmative.

« Il est très curieux que les basses températures elles-mêmes fournissent précisément le moyen le plus efficace et le plus commode que l'on connaisse pour l'obtention de ces vides extraordinaires ; le tout est d'avoir à sa disposition de *l'hydrogène liquide :* autant dire que le procédé n'est pas jusqu'à nouvel ordre à la portée de tout le monde, l'hydrogène liquide, substance encore bien plus extraordinaire que l'air liquide, puisqu'elle ne pèse que *quatre-vingts grammes* par litre et bout à — 252°, n'étant encore préparé, de par le monde, qu'au laboratoire du professeur Dewar à la *Royal Institution!*

« Quoi qu'il en soit, voici le procédé : on verra qu'il valait une mention.

« Le récipient dans lequel on veut faire le vide, tube de Crookes, ampoule de lampe, récipient à air liquide, est relié par un tube de verre soudé à une petite ampoule également en verre : celle-ci est plongée un instant dans un vase contenant de l'hydrogène liquide. A cette température fantastique de — 252°, l'air est non seulement liquéfié, mais *gelé*, au point de ne plus posséder la moindre tension de vapeur : aussi, toutes les molécules d'air du récipient à vider, jusqu'à la dernière, viennent-elles en un clin d'œil se précipiter dans l'ampoule pour s'y congeler.

« Un coup de chalumeau sépare le récipient de l'ampoule et termine l'opération : le vide ainsi réalisé en quelques secondes est si parfait que l'étincelle électrique ne peut le traverser[1] ! »

Etant donné le prix énorme de l'hydrogène liquide, ce procédé peu banal ne constituait jusqu'ici qu'une curiosité de laboratoire ; son auteur, le professeur Dewar, lui a apporté en ces derniers temps un perfectionnement capital, permettant de recourir à l'air liquide, que des procédés industriels permettent maintenant d'obtenir à bas prix. Ce perfectionnement est basé sur la propriété curieuse et bien connue du *charbon de bois* d'absorber les gaz avec énergie, propriété très considérablement exaltée encore à la température de l'air liquide. Il suffit de placer dans la petite ampoule de tout à l'heure un peu de poudre de charbon et de la plonger dans l'air liquide, après avoir fait dans le récipient à épuiser un vide approximatif à l'aide d'une trompe à eau, pour obtenir le même résultat que précédemment.

Nous avons eu l'occasion d'apporter à ce mode opératoire, en collaboration avec M. R. Lévy, des modifications qui rendent l'emploi du procédé essentiellement économique et tout à fait industriel.

---

1. *L'Air liquide*, par G. Claude. Vve Dunod, éditeur.

Rendement des lampes à incandescence. — Un conseil en passant. — Nous avons vu quelles opérations complexes, quelle somme d'ingéniosité et de soins réclame la fabrication d'une lampe à incandescence. Le résultat ne répond guère à ces efforts.

En effet, alors qu'elle a pour but de nous éclairer et qu'elle devrait, en conséquence, fournir des radiations lumineuses à l'exclusion de toutes les autres, la lampe à incandescence transforme en chaleur obscure, absolument perdue pour notre but, *quatre-vingt-dix-neuf pour cent* de l'énergie reçue ! C'est le record du gaspillage : avec ses 7 0/0 de rendement, la machine à vapeur elle-même est en comparaison un outil merveilleux !

Ainsi, au jour béni où quelque inventeur de génie nous dotera de l'appareil idéal transformant en lumière toute l'énergie reçue, nous obtiendrons, pour une dépense *cent fois moindre*, le même éclairage qu'aujourd'hui !

Malheureusement un tel appareil n'existera sans doute pas de longtemps : le tube de Geissler, dont nous parlerons plus loin, s'en rapproche bien avec sa « lumière froide », mais sa puissance lumineuse est si faible qu'il est encore inapplicable. Toutefois nous mentionnerons les résultats remarquables obtenus dans cette voie par l'Américain Cooper Hewitt (p. 395).

Pour l'instant, il faut nous résigner à dépenser pour chaque bougie produite par nos lampes l'énorme puissance de 3 à 3,5 watts, heureux encore si les errements actuels ne haussent pas à 4 ou 5 watts cette moyenne déjà respectable.

Car, ici, j'ai à vous faire une remarque, dont nombre de consommateurs de lumière électrique pourront faire leur profit si — comme nous l'admettrons sans démonstration — la petite opération mensuelle de la note à payer leur est plutôt désagréable.

L'usine d'électricité dont vous êtes tributaire vous vend de l'énergie très cher. A vous d'utiliser au mieux cette énergie pour le but désiré. Or, si vous en voulez faire de la lumière, vous l'envoyez vaille que vaille dans des lampes à incandescence et vous vous figurez que tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes.

Vous vous trompez, et d'importance.

Car, en modifiant quelque peu les conditions habituelles de fonctionnement des lampes à incandescence, on peut améliorer beaucoup leur rendement, ce qui n'est pas étonnant, puisque ce rendement est si mauvais, donc si perfectible. Il suffit de les *pousser* un peu, c'est-à-dire d'augmenter un peu la diff. de pot. à laquelle elles sont soumises et, partant, la puissance qui vient s'y absorber ; dans ces conditions la température s'élève, la lumière devient plus belle, plus blanche, et le rendement lumineux s'améliore de telle façon que, pour une augmentation de quelques volts, la bougie, qui coûtait 3,5 à 4 watts, n'en coûte plus maintenant que 2,5 à 3.

Prenez donc des lampes de 10 bougies marquées 90 volts si le

réseau qui vous alimente est à 100 volts, marquées 100 volts dans le cas d'un réseau à 110 volts ; ces lampes de 10 bougies en donneront 15 ou 16 et votre compteur (V. p. 245) n'en tournera pas beaucoup plus vite.

Mais, m'objecterez-vous, les lampes poussées ont une durée moindre : alors que la durée normale d'une lampe à incandescence est de 600 ou 700 heures, celle d'une lampe poussée s'abaisse à 300, à 200 heures, à moins encore, suivant le degré de *poussage ;* si donc je pousse mes lampes, il me faudra les remplacer plus souvent ! C'est exact, c'est même ce qui retient nombre de consommateurs ; et pourtant, qu'est-ce que cela prouve si l'économie de courant est bien plus grande que le supplément de dépense des remplacements plus fréquents !

Or, tel est bien le cas :

J'admets — je suis généreux — que vos lampes coûtent 1 franc.

Poussées, elles dureront 200 heures au lieu de 600, bien ; donc, en 600 heures, vous userez 3 lampes au lieu d'une, soit une dépense supplémentaire de 2 francs ; entendu.

Mais vos 16 bougies, au lieu de 3,5 watts chacune, n'en coûteront plus que 2,5, soit en tout 40 watts au lieu de 56. Au lieu d'avoir dépensé dans vos 600 heures $56 \times 600 = 33.600$ watts-heures, vous n'en aurez dépensé que $40 \times 600 = 24\ 000$, soit, à 1 franc le k. w. h., 24 francs au lieu de 33 fr. 60.

En ajoutant aux 24 francs les 2 francs supplémentaires, il reste encore 7 fr. 60 d'économie.

Vous réaliserez donc un gain de 20 0/0, en même temps qu'au lieu d'une lumière jaune, indigne du nom de lumière électrique, vous obtiendrez une lumière agréable, d'une blancheur éblouissante.

Ainsi, poussez vos lampes sans remords et le plus possible.

. . . . . .

Voilà de la réclame, messieurs les fabricants de lampes — ou je ne m'y connais pas !

La lampe Nernst. — La lampe à osmium d'Auer. — Si imparfaite et d'un emploi si colossal, la lampe à incandescence devait tenter la concurrence. Mais le problème est malaisé : d'innombrables tentatives se sont succédées, aussi infructueuses les unes que les autres, dans le but, pour la plupart, de faire bénéficier la lampe électrique du remarquable pouvoir émissif des constituants du bec Auer. Malheureusement, imbibé ou recouvert de ces oxydes, chaux, magnésie ou terres rares, le filament de charbon, inévitablement, finit par s'en débarrasser.

Beaucoup plus originale est l'idée du professeur Nernst, qui constitue le filament tout entier par de la magnésie, corps dont l'infusibilité est telle qu'il reste inaltéré au four électrique, alors que la chaux y coule comme de l'eau.

A première vue, l'idée de Nernst paraît absurde : un filament de magnésie oppose au courant, à la température ordinaire, un obstacle absolu. Mais vient-on à l'échauffer, on constate que la conductibilité apparaît progressivement, pour devenir au rouge comparable à celle du charbon.

Il suffit donc, si une lampe à filament de magnésie est montée sur une *prise de courant* ordinaire, d'approcher du filament une allumette enflammée — curieux retour des choses d'ici-bas ! — pour le voir s'illuminer et répandre alors une belle lumière d'une éclatante blancheur, intermédiaire entre celle de l'arc et celle des lampes à filament de charbon. Cet allumage exige naturellement que le fila-

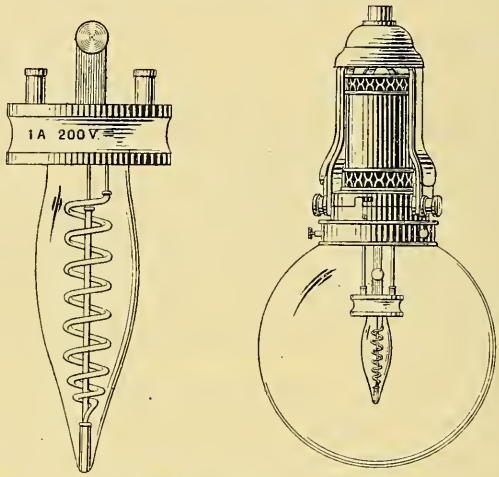


Fig. 63 et 64. — Lampes Nernst.

ment soit à l'air libre : il n'y a pas à cela d'impossibilité, puisque la magnésie n'est pas combustible.

Mais on conçoit que ce dispositif simpliste, qui ferait disparaître le plus gros avantage peut-être de la lumière électrique, n'ait pas contenté l'ambition du professeur Nernst. La source de chaleur destinée à l'amorçage initial est en pratique empruntée au courant lui-même, sous les apparences d'une spirale de platine enveloppant le filament (*fig.* 63) et qui, au moment de l'allumage, est portée au rouge sombre. Après 20 secondes environ, le filament, progressivement échauffé, s'éclaire brusquement, et comme en série avec lui est placé un électro-aimant manœuvrant un interrupteur placé dans le circuit de la spirale allumeuse, celle-ci se trouve aussitôt coupée, ce qui supprime une dépense d'énergie devenue inutile.

Ce procédé ingénieux constitue évidemment un perfectionnement très grand pour la lampe Nernst ; toutefois, la durée appréciable de

l'amorçage peut encore apparaître comme un inconvénient assez grave pour les personnes accoutumées à l'instantanéité d'allumage des lampes ordinaires. Un artifice a été imaginé récemment pour y parer. Il consiste (*fig.* 65) à lancer le courant, en même temps que dans la spirale chauffeuse, dans deux lampes à incandescence ordinaires, que l'électro d'allumage met hors circuit en même temps que la spirale dès que le filament s'allume.

Comparé à celui des lampes ordinaires, le rendement de la lampe Nernst est *au moins double:* une puissance lumineuse de 40 bougies ne coûte que 53 watts, soit 1^{w},25 par bougie. En soi, ceci n'est pas encore absolument merveilleux ; vraisemblablement le résultat serait

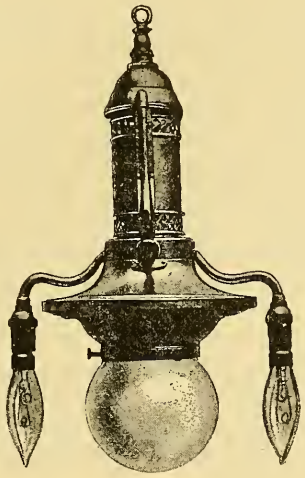


Fig. 65. — Lampe Nernst, type *Express.*

considérablement amélioré si l'on maintenait le vide dans les ampoules. Pourquoi se prive-t-on d'une ressource aussi précieuse ? On donne comme prétexte la complication évitée ; il est beaucoup plus probable qu'en réalité le vide est incompatible, par ses qualités mêmes, avec la nécessité de l'échauffement préalable, et que d'ailleurs il serait difficile à maintenir en service, en raison de la lente libération de particules gazeuses par suite de la dissociation électrolytique du filament.

Citons encore, parmi les tentatives intéressantes, la lampe à filament d'osmium du Dr Auer, dont le rendement serait presque comparable à celui de la lampe Nernst, mais qui n'est pas encore entrée dans la pratique courante.

CALCUL D'UN ÉCLAIRAGE PAR PILES

Choix et calcul d'une batterie d'éclairage domestique. — Nous pouvons maintenant tenir notre promesse et appliquer nos connaissances à l'élaboration, à l'aide de quelques éléments de piles, d'une petite installation d'éclairage électrique domestique. Non que l'éclairage par la pile soit une chose bien recommandable : nous avons fait plus d'une fois pressentir le contraire ; mais, outre que ce sera un excellent moyen de mettre en œuvre les formules établies précédemment, c'est le seul but, répétons-le, que nous puissions viser actuellement pour nous initier à la manipulation pratique du matériel de l'électricien et nous rendre compte de certaines des ressources qu'on peut demander à l'électricité.

Puisqu'il s'agit d'éclairage, nous choisirons des piles aussi constantes et à aussi faible r. intérieure que possible, de manière à atténuer les variations de diff. de pot. que provoquent (p. 66) les variations du nombre des lampes en service.

Il faudra, en outre, que notre pile soit toujours prête à fournir la lumière par le simple jeu d'un interrupteur ou commutateur.

Nous choisirons donc une pile à écoulement à deux liquides [1].

Quelle devra être la puissance de notre batterie ? Cela dépendra naturellement de l'importance de l'éclairage à réaliser. Mettons que nous ne ferons jamais brûler ensemble plus de 3 lampes de 5 bougies. Chacune de ces bougies, si la lampe marche dans de bonnes conditions, nécessite la dépense dans le filament d'une puissance de 3 watts. C'est donc une puissance *utile* totale de $3 \times 5 \times 3 = 45$ watts qui nous est nécessaire.

Mettons 50 watts pour tenir compte des pertes inévitables dans la canalisation.

Si nous prenons, par exemple, des piles au bichromate ($E = 2$ volts), de résistance intérieure égale à 0,06 ohm, elles pourront débiter 5 ampères sous une diff. de pot. aux bornes de 1,7 volt, considérée comme correspondant à un rendement acceptable (p. 98), soit 8,5 watts utiles chacune ; il nous faudra donc $\frac{50}{8,5} = 5,9$ éléments : 5,9 éléments... résultat bizarre ! Mais, comme vous n'êtes pas de ces gens qui, pour faire illusion aux autres et à eux-mêmes, poussent jusqu'à la cinquième décimale des calculs incertains depuis la première, vous ne vous amuserez pas à couper un élément en deux et vous en prendrez 6, tout simplement.

---

1. Si nous avions parlé des accumulateurs, nous dirions : ou de préférence une batterie d'accumulateurs alimentée par une pile à écoulement.

Mode de couplage. — Comment devrons-nous coupler nos 6 éléments ? Cela dépend du *voltage* des lampes à alimenter.

Nous savons qu'à raison de 3 watts par bougie chaque lampe doit absorber $5 \times 3 = 15$ watts, mais nous savons aussi que ces 15 watts peuvent être fournis sous une infinité de formes, soit par une petite intensité agissant sous une grande diff. de pot., soit par une grande intensité et une faible diff. de pot. Or, on fabrique indifféremment des lampes de voltages quelconques, en donnant à la résistance du filament des valeurs appropriées. Nous pouvons donc, pour nos lampes de 5 bougies, choisir le voltage qui nous convient le mieux, pourvu que nous puissions l'obtenir à l'aide d'un couplage approprié de nos 6 éléments.

Disons cependant que plus le voltage de ces petites lampes est élevé, meilleures elles sont ; en outre, en augmentant la diff. de pot. sous laquelle la puissance est fournie, on a besoin d'un moindre courant et on perd moins en frottement dans la canalisation.

On a donc intérêt à choisir la diff. de pot. la plus élevée possible et à coupler les 6 éléments en tension, soit $E = 12$ volts.

On prendra des lampes de 10 volts pour tenir compte de la perte dans la pile et de celle dans la canalisation, ou *perte en ligne*, de sorte que les 15 watts qui se dépenseront dans chaque lampe seront fournis sous la forme $e = 10$ volts, $I = 1,5$ ampère, soit, pour les 3 lampes, 4,5 ampères que la batterie peut aisément fournir, puisque les éléments peuvent débiter 5 ampères.

Remarquons maintenant que la perte de potentiel rI dans la batterie est de 0,5 volt environ pour chaque lampe en service, puisque la résistance intérieure de cette batterie est $6 \times 0,06 = 0,36$ ohm et que la lampe consomme 1,5 ampère. Donc, la variation de potentiel qui accompagnera chaque mise en service ou extinction d'une lampe sera de 0,5 volt.

Or, 0,5 volt sur 10, c'est déjà beaucoup.

En outre, quand 1 lampe seulement sera en service, elle aura à ses bornes 11,5 volts ; quand il y en aura 2, il n'y aura plus que 11 volts, et plus que 10,5 volts, enfin, quand les 3 seront en service.

Cette différence de 1 volt sur 12 entre les diff. de pot. extrêmes est bien grande et nous n'aurons pas beaucoup à nous louer de la fixité de la lumière. Il serait infiniment préférable, si on le pouvait, de faire toujours marcher les 3 lampes *ensemble*.

Établissement de la batterie. — Nous supposerons, maintenant, que nous avons consacré beaucoup de soin à l'établissement des éléments, à la mise en place de la batterie et au couplage. Les *connexions* entre les éléments ont été soigneusement exécutées en fixant solidement les fils dans les *bornes* destinées à les recevoir, et la régularité du montage, l'absence de courts-circuits dans les éléments a été confirmée par un examen judicieux à l'aide du voltmètre.

Il ne nous reste plus qu'à relier les deux pôles de la batterie à la *canalisation* que nous avons établie.

Canalisation. — Qu'est-ce que cette canalisation ? C'est le réseau de fils conducteurs destinés à transporter de la pile vers toutes les parties de la maison où nous en aurons besoin la différence de potentiel créée par la batterie.

Pour l'établir, nous utiliserons du fil de cuivre isolé à la gutta-

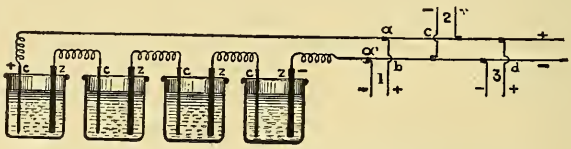


Fig. 66. — Schéma d'une canalisation électrique.

percha ou simplement recouvert d'une ou deux couches de coton et de section suffisante pour ne pas absorber trop d'énergie.

Il est facile de se rendre compte de l'ordre de grandeur de cette section, qui devra être naturellement d'autant plus grosse que le courant sera plus intense et la longueur de la canalisation plus grande. Par exemple, si notre canalisation comporte en tout 20 mètres de fil de cuivre de 2 millimètres de diamètre, elle pré-

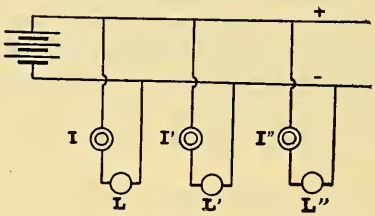


Fig. 67. — Schéma de l'installation de lampes sur une canalisation électrique.

sentera une résistance de 0,1 ohm (Voir les formules de la page 47), lequel 0,1 ohm, traversé par les 5 ampères de notre courant maximum, absorbera 0,5 volt ou 2,5 watts sur 60, ce qui est admissible.

Ce fil choisi, nous le ferons courir en deux conducteurs parallèles (*fig.* 66), depuis la pile jusque vers les points les plus éloignés où nous désirerons utiliser son action. Les deux conducteurs seront fixés aux murs soit à l'aide de *cavaliers*, clous à deux pointes en forme d'U, soit en les dissimulant sous des *moulures* en bois.

Les deux extrémités des fils étant reliées aux pôles de la pile, la diff. de pot. de 12 volts existe désormais entre deux points quelconques de nos deux conducteurs. Voulons-nous la transporter encore de cette artère principale dans tel endroit qui sera nécessaire, il nous suffira de dénuder le métal des deux conducteurs séparément

et sur une très petite longueur, en *a* et *a'*, d'y attacher, au moyen d'une pince, les extrémités mises à nu des deux autres fils isolés, que nous y fixerons au moyen d'une soudure, ou plus simplement de papier d'étain, pour assurer la netteté du contact. Ceci fait, nous recouvrirons les joints au moyen d'une mince feuille de gutta-percha, puis nous dirigerons ces deux fils, toujours à l'aide de cavaliers ou de moulures, vers l'endroit désiré.

Cela s'appelle *prendre une dérivation.*

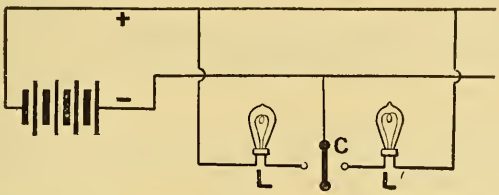


Fig. 68. — Dispositif permettant d'allumer à volonté L ou L'.

Dans une installation, il est commode de pouvoir reconnaître sans recherches le fil positif et le fil négatif ; aussi, dans la pose des canalisations, s'astreint-on à quelques règles très simples : dans les parcours horizontaux, on place le fil positif au-dessus du fil négatif; dans les parcours verticaux, on le place à gauche. Ainsi, dans la figure 66, l'artère principale est correctement posée, tandis que les dérivations ne le sont pas.

Les boucles *b*, *c*, *d*, du schéma (*fig.* 66) indiquent que les fils passent l'un par-dessus l'autre sans se toucher métalliquement.

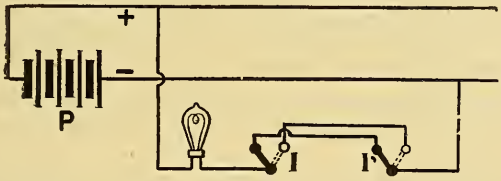


Fig. 69. — Commande d'une lampe de deux endroits différents I ou I'.

Voilà notre canalisation établie. Il ne nous reste plus maintenant qu'à en tirer parti.

Faisons-en cependant, en passant, ressortir la ressemblance avec une canalisation d'eau ; celle-ci a pour but de répartir dans tous les endroits où cela est nécessaire la *pression hydraulique* fournie par un réservoir, pour obtenir un *courant d'eau;* la première est destinée à transmettre en un point quelconque la *pression électrique* fournie par la source, pour y produire un *courant électrique.*

Pour utiliser notre canalisation, nous pourrions tout naïvement (*fig.* 67) relier chacune de nos dérivations avec l'une des lampes qu'il

s'agit d'alimenter, en intercalant simplement dans le circuit un *interrupteur* ou *commutateur I* placé à portée de la main et permettant de ne faire fonctionner la lampe que suivant les besoins.

Mais si nous voulons un dispositif plus commode, bien préférable en beaucoup d'occasions, nous ferons par exemple en sorte que, lorsqu'une lampe s'éteint en un endroit, une autre s'allume en un autre endroit. Le dispositif représenté schématiquement par la figure 68 permettra d'arriver à ce but à l'aide d'un *commutateur à deux directions* C.

S'agit-il, au contraire, de pouvoir allumer ou éteindre à volonté de deux points différents la même lampe, l'examen du schéma de la figure 69 permettra de concevoir comment on peut obtenir aisément ce résultat.

Si, enfin, plusieurs pièces d'un appartement étant en enfilade, on veut les traverser successivement en allumant la lampe placée devant soi dans chacune de ces pièces et éteignant celle laissée en arrière, on emploiera utilement le dispositif représenté schématiquement dans la figure 70, au moyen duquel il suffira de pousser suc-

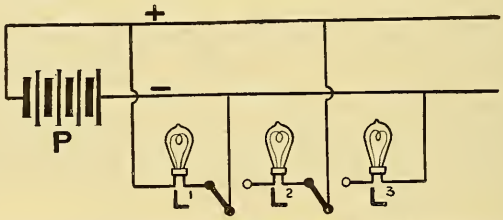


Fig. 70. — Allumage successif de lampes placées dans des pièces en enfilade.

cessivement dans le *sens de la marche* la barrette de l'interrupteur rencontré à la porte de chacune des pièces traversées. Lorsqu'on reviendra sur ses pas, on fera subir aux commutateurs des déplacements en sens inverse.

Telles sont quelques-unes des combinaisons possibles, qu'avec un peu d'ingéniosité il sera loisible de varier de cent manières différentes.

Prix de l'éclairage par piles. — On peut admettre que dans les piles au bichromate bien conçues, le prix du kilowatt-heure — soit 1.000 watts pendant une heure, 50 watts pendant 20 heures, etc., — est d'environ 4 francs.

Chaque bougie représentant une consommation de 3 watts au moins, il en résulte qu'une lampe de 10 bougies, soit 30 watts, absorbant en 33 heures une quantité d'énergie de 1 kilowatt-heure, coûte à alimenter environ 12 centimes par heure. C'est à peu près 6 fois plus que si ces 10 bougies étaient fournies par une lampe à pétrole, en comptant le pétrole à 60 centimes le litre; c'est encore au moins 4 fois le prix de l'éclairage électrique fourni par les secteurs d'électricité.

A cela près...

CHAPITRE DIXIÈME

ÉLECTROCHIMIE

Réversibilité des actions chimiques et électriques. — Nous allons maintenant aborder un ordre de phénomènes qui va singulièrement élargir pour nous le cadre des applications pratiques de l'électricité : je veux parler des phénomènes *électrochimiques*. Nous en avons déjà étudié une application intéressante, celle des piles électriques, mais nous en rencontrerons bientôt une foule d'autres, dont la moindre est devenue le point de départ d'industries importantes.

Qu'on en juge :

Les *accumulateurs électriques* tiennent une place importante parmi le matériel des stations d'électricité et des tramways à traction électrique. La *galvanoplastie*, l'*argenture*, la *dorure* le *nickelage* font vivre de par le monde quelques dizaines de milliers d'ouvriers. L'*électrométallurgie*, nouvelle venue, se crée dans l'industrie des métaux une place chaque jour plus considérable. Enfin, la fabrication électrolytique de la soude et du chlore, celle du chlorate de potasse et de vingt autres produits font trembler sur ses bases la grande industrie chimique elle-même.

De tels phénomènes méritent bien, n'est-ce pas, un peu d'attention?

Nous avons vu — c'est même à l'heure actuelle le plus gros de notre bagage — que les effets chimiques sont capables de produire de l'énergie électrique. Il n'y a donc rien de surprenant à ce que, de son côté, l'énergie électrique soit capable

de produire certains effets chimiques. Allons plus loin : disons que si l'union, la combinaison dans une pile de deux ou plusieurs corps nous fournit une certaine quantité d'énergie électrique, cette combinaison se *défera* si nous lui fournissons, si nous lui imposons au contraire une quantité d'énergie au moins égale et de même *qualité*, de même tension que celle qu'elle a dégagée pour se faire.

On dit dans ce cas qu'on fait une *électrolyse*.

Par exemple, les piles sont *réversibles*, du moins théoriquement; c'est-à-dire que si, lorsque les produits sont épuisés, on force à passer dans la pile un courant emprunté à une source d'électricité étrangère, de sens inverse à celui qu'elle pro-

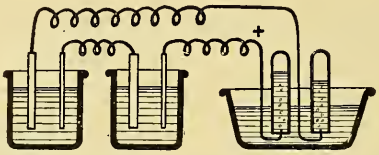


Fig. 71. — Décomposition de l'eau par le courant.

duisait avant son épuisement, les produits sont ramenés à leur état initial, et la pile est régénérée.

Ainsi, dans la pile Daniell, le sulfate de zinc formé est décomposé ; le zinc se dépose sur l'électrode soluble, qui est ainsi remise dans son état initial, tandis que l'acide sulfurique et l'oxygène se portent à travers le vase poreux vers l'électrode positive, dont ils dissolvent le dépôt de cuivre en régénérant le sulfate de cuivre primitif. Pour produire ce courant inverse, on devra naturellement monter la pile épuisée en *opposition* avec une source de f. é. m. *plus grande*, en reliant ensemble les pôles de même nom.

Ceci étant, nous trouverons dès lors naturel que, plongeant les deux pôles d'une pile dans de l'eau légèrement acidulée pour augmenter sa conductibilité, cette eau soit *décomposée* (*fig.* 71).

L'hydrogène se dégagera au pôle négatif, où, si bon vous semble, vous pourrez le recueillir dans une petite éprouvette et l'enflammer; l'oxygène se rendra de son côté au pôle positif et, recueilli par le même procédé, pourra vous faire montre de

ses petits talents de société en rallumant une allumette dont le bout est encore rouge.

Condition nécessaire pour que l'électrolyse se produise. — Pourtant, faites bien attention !

Cette décomposition de l'eau, si aisée qu'elle paraisse pour le courant électrique, nous ne pourrions pas la réaliser avec un seul élément Daniell.

Mieux encore, nous aurions beau prendre toute une batterie d'éléments Daniell couplés en quantité que nous n'en viendrions pas à bout !

Que signifie cet entêtement ?

En y réfléchissant un peu, vous allez le trouver fort naturel.

Si, comme nous l'avons dit (p. 24), chaque nature de pile présente une f. é. m. particulière, cela veut dire que chaque réaction chimique spéciale, selon *l'affinité* des substances qui entrent en combinaison, libère l'énergie électrique sous une tension, à un niveau bien déterminé ; réciproquement, la combinaison étant formée, nous ne pourrons la décomposer en lui fournissant de l'énergie électrique, que si cette énergie est à un niveau, sous une pression, d'une qualité, en un mot, au moins égale à celle qui était fournie lors de la combinaison : elle pourra ainsi lutter victorieusement contre la tendance à la recombinaison des éléments qu'il s'agit de séparer.

En définitive, pour en revenir à la décomposition de l'eau, on voit que l'hydrogène et l'oxygène produisant par leur combinaison une f. é. m. de 1,5 volt, cette eau, à son tour, exigera pour être *électrolysée* une f. é. m. agissante supérieure à 1,5 volt. Comme on dit, l'eau oppose l'électrolyse une force *contre*-électromotrice de 1,5 volt (f. c. é. m.).

Et alors, nous comprenons que l'énergie d'une pile Daniell et même celle de tout un régiment d'éléments Daniell couplés en quantité, étant fournie sous le niveau électrique de 1 volt environ, n'est pas de *qualité* suffisante pour décomposer l'eau : le courant ne passe pas.

Mais prenons, au contraire, deux éléments Daniell, aussi minuscules que vous voudrez les supposer ; couplons-les en tension, et à leur aide nous décomposerons l'eau avec la plus

grande aisance, comme aussi, d'ailleurs, avec un seul élément au bichromate, dont la f. é. m. est de 2 volts.

De même que le courant électrique décompose l'eau, il décompose avec la même facilité les corps les plus énergiquement combinés de la chimie. Il suffit que ce courant soit fourni sous la tension nécessaire pour vaincre la *f. c. é. m.* de chacun, soit 5 à 6 volts au plus.

C'est donc un agent de décomposition d'une puissance merveilleuse.

Ainsi, dans la potasse, le potassium et l'oxygène sont si énergiquement combinés qu'il faut faire appel aux moyens les plus désespérés dont le chimiste peut disposer, aux plus violents feux de forge, pour rompre leur combinaison. Or, ce que le chimiste a tant de mal à réaliser, trois ou quatre modestes éléments de piles permettent à l'électricien de le faire tranquillement. N'en concluez pas malicieusement à la supériorité de l'électricien sur le chimiste, car à notre époque, tout chimiste qui se respecte a dans son âme un... électricien qui sommeille, mais qui, à l'occasion se réveille et manipule de main de maître les volts et les ampères.

Témoins M. Berthelot et M. Moissan.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que ce procédé si puissant de décomposition ait permis de mettre en liberté pas mal de corps simples, d'éléments encore inconnus. C'est ainsi que le potassium, le sodium, le calcium, le baryum ont été vus pour la première fois au pôle négatif d'une pile par le célèbre Davy qui, lui déjà, était un... croisement accompli d'électricien et de chimiste.

Voici la f. c. é. m. de quelques *électrolytes* :

NOM DE L'ÉLECTROLYTE	F. c. é. m. EN VOLTS	NOM DE L'ÉLECTROLYTE	F. c. é. m. EN VOLTS
Eau	1,48	Oxyde de cuivre.....	0,80
Chlorure de sodium.	4,23	Sulfate de zinc.....	2,28
Chlorure de zinc	2,10	Sulfate de cuivre....	1,20
Peroxyde de plomb..	0,26	Sulfure de plomb....	0,44

Dans la décomposition des corps composés, les métaux et

l'hydrogène se dirigent vers l'électrode négative, tandis que les acides, l'oxygène et, le cas échéant, les *métalloïdes* — chlore, brome, iode, etc. — apparaissent au pôle positif. Ainsi, la circulation des produits est ici inverse de ce qu'elle est dans la pile, comme le montre le cas de l'hydrogène, qui, dans la pile, se dirigeait vers l'électrode *positive* pour la polariser (Voir p. 30) : ceci doit être puisque, nous l'avons dit, un courant de sens *inverse* remet les choses en état dans une pile épuisée, puisque l'électrolyse est le phénomène inverse de la combinaison chimique utilisée dans la pile. On peut remarquer par la même occasion que l'hydrogène et les métaux, qu'il s'agisse de la cuve électrolytique ou de la pile, vont toujours dans le sens du courant, mais que, par contre, les acides et les métalloïdes mis en liberté en même temps vont toujours à rebours[1].

LOIS DE L'ÉLECTROLYSE

Evaluation du travail chimique de l'électrolyse. — Parlons maintenant des lois des actions électrochimiques.

Nous en avons déjà rencontré une, à savoir, que le courant, pour pouvoir traverser un *électrolyte*, doit être produit par une f. é. m. E *au moins égale* à la f. c. é m. E' opposée par cet électrolyte. Si cette condition est réalisée, le courant passe. Sinon il ne passe pas : le liquide se comporte alors *comme un véritable isolant*.

Mais supposons que le courant soit dans les conditions nécessaires pour passer et appliquons à son étude le voltmètre et l'ampèremètre (*fig.* 72).

Une surprise nous attend.

Si nous avons pris d'abord E très peu supérieur à la f. c. é. m. E', le courant était très faible. Si maintenant nous dou-

1. On voit que ce n'est pas encore cela qui peut lever notre incertitude sur le sens *réel* du courant électrique (Voir p. 18). D'ailleurs, la remarque ci-dessus n'est vraie que si, dans une combinaison, on a *à la fois* métaux (ou hydrogène) et métalloïdes

blons E, nous constatons que ce courant devient 5, 10 fois plus grand.

Que signifie cela? D'après la loi de Ohm, en doublant E, nous ne devrions que doubler le courant produit! Oui, mais voilà justement le *hic :* la loi de Ohm ne s'applique plus ici. La loi de Ohm n'est applicable à un circuit que si, dans ce circuit, *toute* l'énergie fournie par la source se transforme en chaleur, comme c'est par exemple le cas si ce circuit est constitué par une lampe à incandescence. Si, au contraire, une partie de l'énergie disparaît sous une autre forme, la loi de Ohm n'est plus applicable. C'est bien le cas ici, puisqu'une partie de l'énergie que nous envoyons à la cuve électrolytique est employée sous forme chimique à décomposer notre électrolyte.

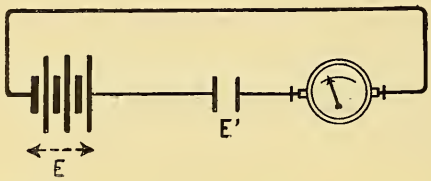


Fig. 72. — Le courant qui traverse le voltamètre croît *plus vite* que la diff. de pot.

Effectivement, en y regardant de plus près, on voit que, dans ce circuit de résistance R, soumis à une f. é. m. E, le courant n'est pas $I = \frac{E}{R}$ comme le voudrait la loi de Ohm, mais seulement $I = \frac{E - E'}{R}$: c'est-à-dire que nous ne pouvons plus appliquer la loi de Ohm qu'après avoir défalqué de la f. é. m. agissante la f. c. é. m. opposée par l'électrolyte. Par exemple, si la force électromotrice appliquée est 4 volts, la f. c. é. m. 2 volts et la résistance du circuit 4 ohms, l'intensité du courant ne sera que $I = \frac{4 - 2}{4} = 0{,}5$ ampère. En somme, une partie seulement $E - E'$ de la f. é. m. est employée pour vaincre la résistance passive totale du circuit R, tandis qu'une autre partie E' est employée pour défaire la combinaison des constituants de l'électrolyte.

Mais cette décomposition exige un certain travail ? Oui, assurément, et nous allons bien voir lequel.

Notre pile débite dans le circuit le courant I sous la pression E, sans avoir à s'occuper de ce qu'il y a dans ce circuit: elle développe toujours, ce faisant, une puissance EI. Or, dans ce circuit, il ne se dépense, sous forme de chaleur, qu'une puissance $P = RI^2$ (voir p. 60), que nous pouvons mettre, puisque $I = \frac{E - E'}{R}$, sous la forme

$$RI \times I = R \frac{E - E'}{R} \times I = (E - E') I.$$

Comme la pile fournit EI, qu'une partie seulement $(E - E') I$, ou $EI - E'I$, disparaît en chaleur, il faut bien que ce qui manque à l'appel, c'est-à-dire $E'I$, ait été absorbé sous une autre forme. C'est en effet ce qui a été employé sous forme chimique pour provoquer la décomposition de l'électrolyte.

Loi de Faraday. — Sans plus tarder, faisons une remarque importante.

L'énergie fournie par la source d'électricité au voltamètre se divise, d'après ce qui précède, en travail chimique et en travail d'échauffement.

Nous tirons immédiatement de là que, pour avoir dans un circuit électrolytique un bon rendement en travail chimique, il faudra que le travail d'échauffement dans les résistances passives soit aussi faible que possible, c'est-à-dire que ces résistances passives soient réduites au minimum.

Mais que signifie cette expression, chercher un bon rendement chimique ? Cela se traduit d'une façon terre à terre en disant que nous voulons, à l'aide d'une dépense donnée d'énergie électrique, décomposer le plus possible de l'électrolyte, par exemple déposer le maximum de cuivre si nous nous occupons de *galvanoplastie* (Voir p. 146).

Or, qu'est-ce que c'est, ce plus possible ?

C'est bien simple : un certain poids de deux ou plusieurs corps donnés, en se combinant, dégage toujours une même quantité d'énergie, bien déterminée par les chimistes. Sou-

mettons le corps résultant de la combinaison à l'action d'une quantité d'énergie précisément égale, sous la forme de courant électrique et sous la tension nécessaire : tout ce que pourra faire cette énergie, ce sera évidemment de redécomposer la totalité de la combinaison ; elle n'en pourrait pas décomposer davantage, mais au contraire, elle en décomposera en réalité toujours moins, parce que toujours elle rencontrera des causes de pertes qui diminueront le rendement.

Ainsi, dans un circuit électrolytique, une quantité d'énergie électrique donnée décompose, au maximum, un certain poids d'un électrolyte déterminé, poids qui, d'ailleurs, dépend de la nature dudit électrolyte ; *par unité de temps*, nous électrolysons une quantité de matière proportionnelle à la puissance dépensée chimiquement, soit $E'I$. Mais nous savons que E' est une quantité fixe pour un électrolyte donné ; dire que la quantité électrolysée par unité de temps est proportionnelle à la puissance chimique $E'I$, revient donc à dire qu'elle est proportionnelle à l'intensité I; ainsi, en définitive, la quantité de substance électrolysée par unité de temps dépend de I et d'un certain coefficient k, l'*équivalent électrochimique*, variable avec chaque corps.

Quant à la quantité *totale* de matière déposée au bout d'un certain temps, on voit qu'elle dépend, comme nous l'avions annoncé il y a longtemps (Voir p. 19), de la *quantité d'électricité* $I \times T$ [1] qui, pendant ce temps T, a traversé le circuit. Comme l'unité de quantité dont nous avons parlé, le coulomb, est trop petite en pratique, on se sert en général comme unité pratique de l'*ampère-heure*, qui représente la quantité d'électricité transportée en une heure ou 3.600 secondes — et non plus en une seconde — par un courant d'un ampère.

L'ampère-heure équivaut donc à 3.600 coulombs.

---

1. Ne pas confondre *quantité d'électricité*, produit de l'intensité par le temps, avec *quantité d'énergie électrique* ou *travail électrique*, qui, nous l'avons fait remarquer lors de notre comparaison avec une chute d'eau (p. 56), représente le produit de la puissance électrique par le temps.

Voici les quantités de différents corps mises en liberté par le passage de 1 ampère-heure :

NOM de L'ÉLÉMENT LIBÉRÉ	POIDS libéré EN GRAMMES	NOM de L'ÉLÉMENT LIBÉRÉ	POIDS libéré EN GRAMMES
Hydrogène.....	0,03738	Cuivre.....	1,17700
Potassium.....	1,45950	Mercure.....	3,73450
Sodium.....	0,85942	Fer (ferreux).....	1,04480
Aluminium.....	0,34018	Nickel.....	1,09530
Argent.....	4,02500	Zinc.....	1,21330

Si nous accordons aux chiffres inscrits dans ce tableau un moment d'attention, nous ne tardons pas à déceler entre eux une relation fort importante signalée pour la première fois par Faraday : par rapport au nombre relatif à l'hydrogène, le poids de sodium libéré, par exemple, est 23 fois plus grand, celui de l'argent 108 fois, etc... Or, chose curieuse, d'après les déterminations des chimistes, les *atomes* de sodium et d'argent sont respectivement 23 et 108 fois plus lourds que l'atome d'hydrogène !

Qu'est-ce à dire? Ceci, évidemment : une quantité donnée d'électricité libère toujours *le même nombre d'atomes*, quel que soit leur poids[1]. Et comme les théories modernes nous montrent cette électricité libératrice s'accrochant à chaque atome jusqu'à l'électrode où il se rend, constituant avec lui ce qu'on appelle un *ion*, il en résulte que la charge électrique qui accompagne chaque atome pendant l'électrolyse est parfaitement constante et indépendante de la nature de cet atome[2].

Cette charge élémentaire d'électricité, nous aurons plus tard la surprise de la rencontrer, immuable dans sa valeur, dans des circonstances bien différentes (voyez *Causeries sur le Radium*), et nous serons amenés, par son immuabilité même,

1. A condition pourtant qu'il s'agisse d'éléments *monoatomiques*, hydrogène, chlore, potassium, etc. Pour les éléments bi ou triatomiques. fer, nickel, aluminium..., le tableau ci-dessus permet de se rendre compte que le nombre d'atomes libérés est 2 ou 3 fois moindre.

2. Toujours s'il s'agit d'éléments monoatomiques. Pour des éléments bi ou triatomiques, la charge attachée à chaque atome est 2 ou 3 fois plus grande.

à la considérer comme l'atome insécable d'électricité, l'*électron*[1].

ÉLECTROLYSE A ANODE SOLUBLE

Nous avons vu (p. 129) que toute électrolyse nécessite une certaine diff. de pot., qui dépend uniquement de la f. c. é. m. de l'électrolyte.

Ceci suppose cependant que les électrodes sont inattaquables par les produits de l'électrolyse, comme c'est par exemple le cas si ces électrodes sont en platine ou en charbon. Mais il n'en est plus de même si les électrodes sont attaquées, car alors il y a là une cause d'énergie supplémentaire qui vient renforcer les résultats dus à la source.

Supposez, par exemple, que nous employions comme électrolyte une dissolution de sulfate de cuivre et comme électrode positive plongeant dans ce liquide une lame de cuivre. Que va-t-il se passer?

Au passage du courant, le sulfate de cuivre est décomposé comme nous l'avons dit. Le cuivre se dépose sur l'électrode négative, dont la nature, elle, importe peu ici, en une couche d'épaisseur progressivement croissante. Cette première action, décomposition du sulfate de cuivre, nécessite une dépense d'énergie et se fait, conformément aux explications précédentes, moyennant l'absorption d'une partie,

---

1. Si, m'accordant un crédit que je m'efforcerai de justifier, mes lecteurs supposent dès maintenant acquise cette notion, l'*ion*, résultat de l'union d'un atome et d'un électron, se révèle déjà par la constance de sa constitution comme une véritable combinaison définie, analogue à nos *combinaisons chimiques*. Cette présomption s'affermit encore si l'on remarque que les propriétés de l'atome constituant sont, dans l'ion, neutralisées à tel point que s'il s'agit de potassium, ce métal est véhiculé jusqu'à l'électrode négative sans décomposer l'eau : il ne recouvre cette propriété qu'après avoir perdu, au contact de l'électrode, la charge qui l'accompagnait, l'électron, aspiré dans la circulation générale du courant.

En somme, appelés à délimiter les frontières qui séparent la matière et l'énergie, les savants en arrivent à se demander aujourd'hui si ces frontières ne seraient pas une fiction, — si cet électron, dont la masse serait environ le millième de celle de l'atome d'hydrogène, ne serait pas une véritable matière et plus probablement la matière originelle elle-même (Voir plus loin *Causeries sur le Radium*.

1,20 volt, de la f. é. m. agissante et au taux de 1gr,18 de cuivre déposé par ampère et par heure.

Mais ceci n'est qu'une des parties du phénomène, car, de leur côté, l'acide sulfurique et l'oxygène mis en liberté par l'abandon du zinc se dirigent vers l'électrode positive. Là ils rencontrent du cuivre qui, conformément aux lois de la migration des métaux, voudrait bien aller aussi vers l'électrode négative, mais que sa *solidité* attache au rivage.

Qu'à cela ne tienne!

L'acide sulfurique et l'oxygène apportent justement au cuivre de quoi prendre à l'état de sulfate de cuivre la forme liquide qui sera le mode de *véhiculage* rêvé, de sorte qu'à son tour le cuivre de l'électrode positive pourra se diriger vers l'autre électrode et s'y déposer.

Donc, si au pôle négatif il y avait destruction de sulfate de cuivre, au pôle positif, au contraire, il y a formation de ce même sulfate en quantité justement égale ; si la première absorbait de l'énergie, la seconde nous en restitue précisément autant; si la première, source de f. c. é. m., absorbait une portion de la f. é. m. agissante, la seconde, source de f. é. m., rend à cette f. é. m. agissante ce qu'elle avait perdu. En résumé, tout se borne donc à un transport de métal de l'électrode positive (ou *anode*) à l'électrode négative (ou *cathode*), transport effectué *sans dépense d'énergie* autre que celle qui est absorbée par les résistances passives, et sans que la composition du bain subisse la plus petite modification.

On verra quel parti on a su tirer de ces caractères si intéressants de l'électrolyse avec *anode soluble* dans la galvanoplastie et dans le raffinage électrique des métaux.

RÉSUMÉ

De même que l'énergie chimique est capable de produire des effets électriques, réciproquement l'énergie électrique peut provoquer des effets chimiques. Si on soumet un corps composé conducteur, ou *électrolyte*, à l'action d'une diff. de pot. au moins égale à la *force contre-électromotrice* de cet électrolyte, il est décomposé, *électrolysé*. Plusieurs

corps simples de la chimie ont été découverts à l'aide de ce puissant moyen d'action.

Cette électrolyse est caractérisée par l'absorption sous forme chimique d'une partie $E'I$ de la puissance fournie par la source, en appelant E' la f. c. é. m. de l'électrolyte considéré. La quantité de matière électrolysée à chaque instant dans un circuit dépend donc en réalité de la *puissance* absorbée sous forme chimique $E'I$; mais, comme la f. c. é. m. est une valeur constante pour un électrolyte donné, on peut dire que cette quantité électrolysée à chaque instant dépend de I, c'est-à-dire du courant. La quantité *totale* de produit électrolysé au bout d'un certain temps dépend ainsi de la *quantité d'électricité* qui a traversé le circuit pendant ce temps, quantité qu'on exprime généralement en *ampères-heures*, le coulomb étant trop petit en pratique.

Si les deux électrodes sont en métal identique et plongent dans une solution *de ce même métal*, l'énergie absorbée à la *cathode* pour la décomposition du sel est restituée à l'*anode* par la dissolution du métal, et tout se borne à un *transport de métal* de l'une à l'autre électrode, transport effectué presque *sans dépense d'énergie*. Cette action est mise à profit en galvanoplastie et en électrométallurgie.

CHAPITRE ONZIÈME

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROCHIMIE

LES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

Raison d'être des accumulateurs. — Supposons — la supposition, je pense, n'a rien de désobligeant — que vous soyez l'heureux propriétaire d'une chute d'eau.

Pas le Niagara à coup sûr.

Votre chute se présente sous les auspices d'un maigre filet d'eau tombant à regret de quelques mètres de hauteur et rentre de plein droit dans la catégorie des chutes que nous avons qualifiées de chutes de *faible puissance*.

Mais on veut toujours paraître plus riche que l'on n'est : le désir vous hante de faire produire à votre chute un effet hydraulique imposant, grandes eaux donnant vaguement l'impression de Versailles ou mise en mouvement d'une turbine puissante.

Comment faire?

Évidemment, au lieu de laisser s'écouler continuellement le minuscule filet d'eau qui ne peut servir à rien, vous allez le diriger dans un réservoir où le liquide s'accumulera petit à petit, puis, au moment de produire votre effet, vous lancerez en épaisses cataractes le contenu du réservoir vers votre cascade ou sur les aubes de votre turbine.

Ainsi, à l'aide de cet artifice, en accumulant pendant un temps très long l'énergie que vous apporte miette par miette votre chute, puis en la dépensant en un temps très court sous forme d'une puissance plus grande, vous avez changé les caractères de la chute ; vous lui avez permis de rendre des services qu'elle n'eût pu rendre sans cela ; en un mot, vous lui avez donné une valeur.

Vous concevez que le même problème se pose en électricité avec le même intérêt.

Les sources d'électricité que vous connaissez jusqu'à présent, les piles, sont des outils d'assez faible puissance. Par contre, elles peuvent marcher pendant un temps très long, même la nuit, sans qu'on ait à s'en occuper ; malheureusement on n'a généralement besoin d'elles que quelques instants, quelques heures au plus chaque jour. Il y aurait donc intérêt à les faire fonctionner continuellement et à recueillir leur énergie dans un appareil susceptible de l'emmagasiner et de la rendre en un temps beaucoup plus court, à l'avantage de la grandeur des effets produits. On utiliserait ainsi beaucoup mieux la batterie, et, comme tout à l'heure « votre chute », on la rendrait capable d'effets dont, laissée à ses seules forces, elle eût assurément décliné la responsabilité.

Or de tels réservoirs existent. On ne s'est pas donné beaucoup de mal pour leur trouver un nom : on les appelle des *accumulateurs électriques*.

D'ailleurs, vous avez pu le remarquer, les électriciens sont la sobriété même sur le terrain des noms de baptême et ne cherchent pas — Dieu merci ! — à battre un record que les médecins tiennent à conserver.

J'ai voulu vous montrer, en vous parlant des piles, la raison d'être des accumulateurs électriques. Mais il ne faudrait pas croire qu'ils sont confinés dans la maison de l'amateur électricien. Tant s'en faut. C'est là le moindre de leurs débouchés, et en eux nous abordons pour la première fois des outils vraiment industriels, dont la place est marquée à l'*usine* de production de l'énergie électrique.

Les usines d'électricité des villes, à l'époque actuelle, ont comme tâche principale de fournir la lumière aux habitations avoisinantes, auxquelles elles sont reliées électriquement par une canalisation *aérienne* ou *souterraine*.

Un matériel très coûteux : chaudières, machines à vapeur, dynamos, est, dans ces usines, consacré à la production de l'énergie électrique. S'il était réduit à ses propres forces, il ne serait utilisé que pendant la partie de la journée où les *abonnés* du réseau ont besoin de lumière. Pendant tout le reste du temps, il resterait inutilisé.

Or, à cette inaction regrettable, on peut substituer une utilisation bien plus parfaite, une marche interrompue seulement quelques heures par jour pour les besoins de l'entretien des machines, en employant les dynamos à charger des accumulateurs, qui, la nuit venue, déverseront dans la canalisation toute l'énergie — sauf les pertes — qu'ils auront absorbée. On peut alors, suivant les cas, ou bien réduire dans une mesure considérable la puissance de la machinerie, c'est-à-dire son prix, puisque les accumulateurs condensent sur quelques heures l'effort prolongé demandé au matériel ; ou bien

augmenter le nombre des abonnés, puisqu'on est en mesure de leur fournir au moment psychologique, grâce à la réserve des accumulateurs, beaucoup plus d'énergie.

L'existence des accumulateurs est ainsi justifiée : préoccupons-nous maintenant de savoir ce que sont ces appareils.

PRINCIPE DES ACCUMULATEURS

La découverte de Planté. — Effectuons l'électrolyse de l'eau acidulée à l'aide de deux électrodes en *plomb* A et B placées en regard (*fig.* 73).

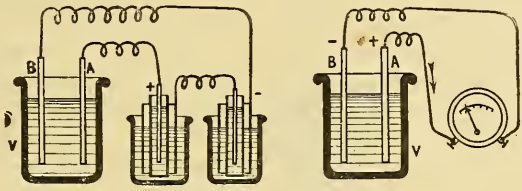


Fig. 73 et 74. — Principe des accumulateurs.

Nous observons qu'avec ces électrodes les gaz *ne se dégagent pas* pendant un temps assez long. Ils restent, ils s'accumulent sur les deux électrodes, qui se recouvrent d'une couche noire du côté de l'hydrogène, d'une couche brune du côté de l'oxygène. Nous reconnaissons là notre vieille ennemie la *polarisation!* Mais ici, ce n'est plus une ennemie.

Bien au contraire, comme vous l'allez voir.

Relions aux deux bornes d'un ampèremètre (*fig.* 74) les fils de jonction de nos électrodes polarisées. Nous constatons le passage *d'un courant énergique* allant de la lame qui était reliée au pôle + vers l'ampèremètre. Eh oui ! lorsque nous fermons le circuit, l'hydrogène et l'oxygène accumulés sur les électrodes s'empressent de se recombiner et nous restituent, par leur combinaison, l'énergie que la pile avait fournie pour la décomposition.

Nous avons donc *accumulé* dans notre système, sous une forme aisément restituable, une partie de l'énergie fournie par la pile, et il ne suffira que de savoir s'y prendre pour rendre très grande cette accumulation.

Naturellement, de même que l'énergie fournie par la pile l'avait été sous un potentiel de 1,5 volt — 1,5 volt étant la f. c. é. m. de l'eau — de même elle doit être restituée sous un potentiel de 1,5 volt. Pourtant, si nous mesurons la f. é. m. de notre *pile secondaire*

comme on l'appelle, nous la trouvons égale à 2 volts au moins. Par contre, il a fallu aussi vaincre cette f. c. é. m. en employant pour la charge une source de plus de 2 volts.

Cette anomalie tient à ce que les phénomènes ne sont pas aussi simples que nous venons de l'expliquer et se compliquent de la présence du plomb et de l'acide sulfurique.

On *sait* qu'il se forme à la charge une couche de peroxyde de plomb du côté où l'oxygène se dégage (pôle +) et une couche de plomb réduit du côté de l'hydrogène (pôle —). On *croit* qu'à la décharge, l'oxygène de la lame positive et l'acide du liquide se portent vers la lame négative, dont ils sulfatent le plomb, tandis qu'à l'autre lame le peroxyde de plomb, transformé en protoxyde par le départ de l'oxygène, est également sulfaté.

Ce serait cette double sulfatation qui produirait le courant.

Quant au sulfate ainsi formé, il serait, lors du passage du courant de charge, d'une part électrolysé sur la plaque négative et ramené alors par l'afflux d'hydrogène à l'état de plomb réduit, d'autre part transformé progressivement en peroxyde de plomb à la lame positive par suite de l'afflux de l'oxygène. Ce qui vérifie cette hypothèse, c'est que la richesse du liquide en acide sulfurique augmente progressivement au fur et à mesure de la charge et diminue, au contraire, pendant la décharge.

Mais ce n'est, malgré tout, qu'une hypothèse approximative, et la théorie de l'accumulateur, vraie bouteille à l'encre, est encore pour nos savants l'occasion de nombreuses prises de bec.

C'est Gaston Planté qui a constaté en 1860 cette action curieuse des électrodes de plomb et qui a vite compris le parti qu'on pourrait en tirer au point de vue de l'accumulation. Il a, en effet, par des dispositifs spéciaux, réussi à rendre très grande l'action des gaz sur les électrodes, cette action se faisant d'ailleurs d'une façon très particulière, très différente de la polarisation des piles, et qui n'aggrave pas la résistance intérieure.

Cette dernière, au contraire, peut être réduite à l'extrême limite par l'emploi d'électrodes très rapprochées, de très grande surface, et on dispose alors d'une source tenant en réserve une quantité considérable d'énergie, qu'elle peut restituer sous une intensité très grande, Nous trouvons là l'équivalent de notre réservoir hydraulique, avec toutes ses qualités.

Accumulateur Planté. — L'accumulateur Planté, sous sa forme classique (*fig.* 75), se compose d'un vase en verre rempli d'eau acidulée sulfurique, dans laquelle plonge une double spirale constituée par les deux électrodes de plomb roulées ensemble et maintenues à quelques millimètres l'une de l'autre par deux bandes de caoutchouc. On réalise de cette façon le maximum de surface d'électrodes compatible avec un vase donné.

Mais si les deux électrodes étaient en plomb non modifié, elles ne pourraient suffire à constituer un accumulateur pratique : leur faculté d'absorption des gaz serait trop faible, et, après quelques instants de *charge*, on verrait ces gaz se dégager sous forme de bulles, aux dépens de l'énergie fournie. Il faut donc faire en sorte d'augmenter la capacité de ces électrodes, et c'est à ce résultat que M. Planté est arrivé à l'aide d'une curieuse opération à laquelle il a donné le nom caractéristique de *formation* des plaques (*fig* 75).

Cette formation consiste à faire passer pendant très longtemps un courant intense à travers l'accumulateur, en inversant le sens de ce courant chaque fois que des bulles de gaz commencent à se dégager abondamment aux électrodes. A chaque circulation de courant dans un sens donné, l'oxygène se dégageant sur l'une des électrodes

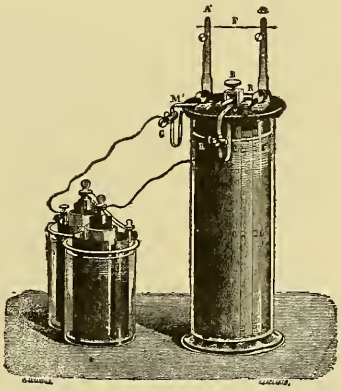


Fig. 75. — Accumulateur Planté sous sa forme primitive : formation.

forme avec le plomb une couche brune de peroxyde de plomb, tandis que, sur l'autre électrode, l'hydrogène *réduit* la couche d'oxyde précédemment formée, la transformant en une couche noire de plomb spongieux. A l'inversion suivante, l'oxygène réoxyde très aisément le plomb spongieux, puis il attaque en outre légèrement la couche sous-jacente de plomb cohérent. L'épaisseur de la couche attaquée augmente donc petit à petit à chaque opération, de sorte que la *capacité* de l'accumulateur augmente graduellement.

Après quelques mois de ce laborieux *défrichage*, on dit que l'accumulateur est *formé*. Alors qu'au début les gaz se dégageaient après quelques instants de charge, ils n'apparaissent plus maintenant, après avoir saturé les deux couches, qu'après une charge prolongée plusieurs heures. L'instrument est devenu un outil industriel, capable d'emmagasiner par kilogramme d'électrodes plusieurs ampères-heures. Mais quel instrument coûteux, si l'on en juge par ce que nous avons dû dépenser de temps et de courant pour sa formation !

Aussi, on juge de la satisfaction de M. Planté quand il s'aperçut de la possibilité de réduire le temps de la formation au tiers ou au quart de ce qui était auparavant nécessaire, en faisant préalablement baigner pendant 48 heures les électrodes dans de l'acide azotique étendu. Il y avait sans doute là une sorte de ramollissement de la surface du métal, qui rendait moins pénible sa pénétration ultérieure.

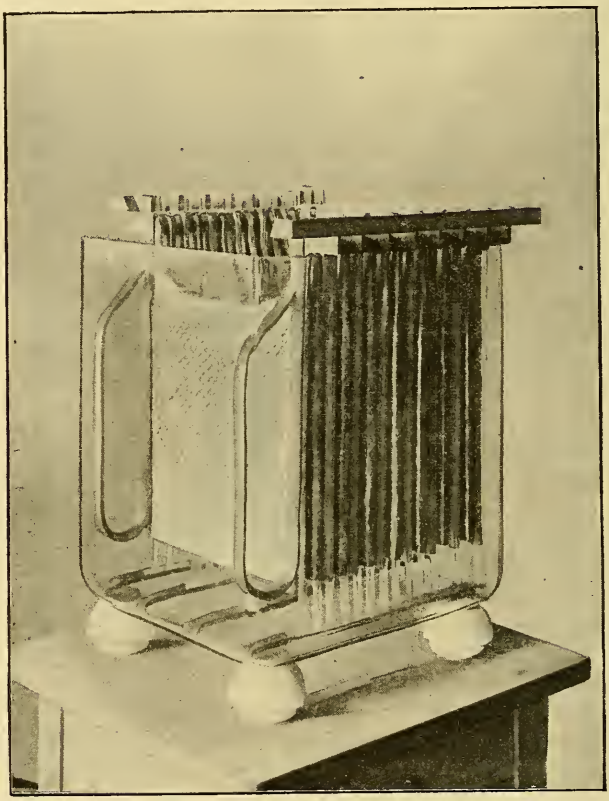


Fig. 76. — Accumulateurs *Union*.

Accumulateurs Faure. — Aujourd'hui, même perfectionnée de cette façon, la formation Planté est complètement passée de mode. On utilise maintenant fort généralement une idée très simple due à M. Faure.

Au lieu de s'escrimer à former sur des plaques qui y mettent tant de mauvaise grâce une couche imperceptible d'oxyde ou de plomb spongieux, on recouvre tout bonnement ces plaques d'oxyde artificiel, puis on fait passer le courant. La couche du pôle + est peroxydée, celle du pôle — est transformée en plomb spongieux et, du coup, l'accumulateur est formé. L'œuf de Christophe Colomb ! Mais il fal-

lait le trouver, et la preuve, c'est que l'accumulateur Planté date de 1860, alors que « l'éclair de génie » de M. Faure est de vingt et un ans plus jeune.

Et notez que par-dessus le marché, nous pouvons mettre la couche d'oxyde aussi épaisse que nous voulons, tandis que celle de Planté avait bien du mal à décrocher le dixième de millimètre. Aussi la capacité des accumulateurs Faure est-elle bien plus grande.

Il ne faudrait pourtant pas croire qu'on peut aller indéfiniment dans cette voie de l'augmentation d'épaisseur de la *matière active*, car celle-ci n'est pas très conductrice du courant ; en outre, surtout au pôle positif, elle *foisonne* à la charge comme à la décharge et peut déterminer par sa chute des courts-circuits regrettables.

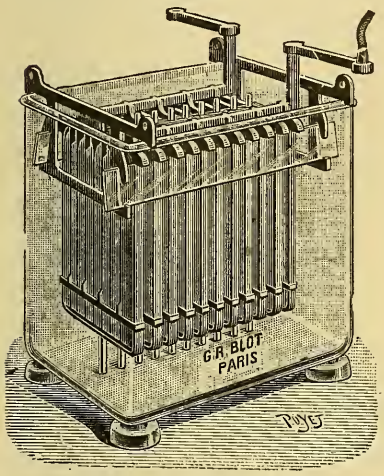


Fig. 77. — Accumulateur Blot.

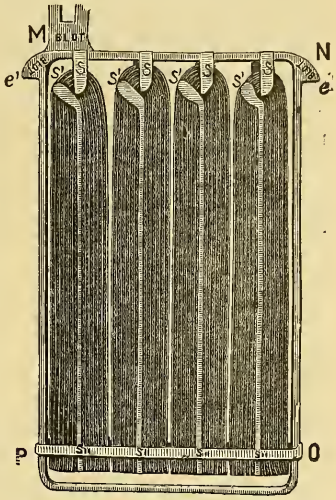


Fig. 78. — Détail d'une plaque.

Aussi, la lutte entre les différents accumulateurs se résume-t-elle principalement aujourd'hui à assurer la solidité de la couche de matière active en l'englobant en *pastilles* dans un squelette, une âme métallique munie de griffes ou de rainures savamment combinées.

D'ailleurs, la forme en spirale des électrodes de Planté est complètement abandonnée; elle est remplacée par la forme en *plaques* alternativement positives et négatives, toutes les plaques de même nom reliées par un conducteur commun, muni d'une prise de courant (*fig.* 76 et 77).

Quelquefois, comme dans les *Fulmen*, on empêche la chute de matière active en mettant entre les plaques successives un grillage en celluloïd. Dès 1881, M. Faure avait eu une idée analogue, mais il employait du drap.

Mais, somme toute, si la matière active de Faure a de grands avan-

tages, ce ne sont pas les inconvénients qui lui manquent! Elle n'a pas les qualités de durée et de solidité de la couche microscopique des Planté. Aussi peut-on constater en ce moment une sorte de réaction contre la « pastille » et un retour vers les idées de Planté, qu'on s'efforce simplement de mieux mettre à profit en portant à l'extrême limite la surface des électrodes, comme compensation à la profondeur. L'accumulateur à *navettes* de *Blot*, dont la figure 88 reproduit l'une des plaques, l'accumulateur *Union*, à plaques négatives genre Faure, à plaques positives genre Planté, l'accumulateur d'*Arsonval* et *Vaugeois* et beaucoup d'autres types procèdent de cette tendance.

Défauts des accumulateurs actuels. — Ce curieux exemple de recommencement des choses d'ici-bas prouve bien que l'on n'est pas encore satisfait de l'accumulateur actuel, que ce n'est pas encore un outil bien fameux.

Effectivement, les accumulateurs dont la capacité est actuellement la plus grande, ceux du type Fulmen, donnent au grand maximum 15 ampères-heures par kilogramme de poids total, soit 30 watts-heures, puisque le courant est fourni sous la tension de 2 volts. Or, si l'on en conclut le poids réellement utile — c'est-à-dire le poids du sulfate de plomb formé — on trouve que ce poids est de l'ordre des centièmes du poids total. Il y a donc plus de 95 de poids inutile pour 4 ou 5 seulement de poids réellement utile ! L'électrode de plomb, qui sert de simple support aux gaz, est en effet un *impedimentum* bien lourd, mais le malheur est qu'un autre métal plus léger ne saurait actuellement la constituer.

Aussi, l'accumulateur actuel est environ *cinquante fois* moins efficace que le pétrole, au point de vue de la quantité d'énergie utilisable sous forme mécanique, et *trente fois* moins que le charbon : c'est lamentable, tout simplement ! Ce qui n'a pas empêché certaines gens de proposer sérieusement le remplacement du charbon par des accumulateurs à bord des paquebots : tant il est vrai que tous les records sont bons à décrocher, même celui de l'absurde...

En outre de ce faible emmagasinement, l'accumulateur n'échappe pas au sort commun des sources d'électricité. Il présente une certaine résistance intérieure, d'ailleurs très faible. Donc, à la charge, une partie de l'énergie fournie est absorbée dans cette résistance intérieure ; une autre est perdue également à la décharge.

Enfin, dans l'intervalle qui sépare la charge de la décharge, une partie de l'hydrogène et de l'oxygène se recombinent.

Pour toutes ces raisons, le rendement des accumulateurs n'est pas excellent — surtout si charge et décharge sont rapides. Même avec de grandes batteries, celles qu'on emploie dans les stations centrales, on peut s'estimer très heureux quand il atteint 80 0/0; et on n'est pas surpris outre mesure quand il est de 60...

Pas surpris — mais pas plus satisfait pour cela, certes ; — et il

faut espérer, pour le bon renom de l'électricité, qu'on n'en restera pas là, que l'accumulateur au plomb ne sera pas éternel.

Mais cet espoir, au moins, est-il justifié? Oui. La théorie l'autorise pleinement.

Nous savons que toutes les actions électrolytiques sont en principe réversibles ; un électrolyte quelconque décomposé par le courant fournit en général des quantités énormes d'énergie lorsque ses éléments se ressoudent : 200, 500, 1,000 watts-heures par kilogramme. On saura sans doute quelque jour utiliser certaines de ces actions dans des conditions incomparablement meilleures que celles que nous fournit l'immuable type *plomb-plomb* actuel. On a déjà essayé dans cet ordre d'idées, mais sans résultats nettement définis, des accumulateurs au cuivre, au zinc, au cadmium. Edison, en ce moment même, bat de la grosse caisse qui lui est chère autour d'un nouveau-né, *nickel-fer*, ou bien *nickel-cuivre* — il ne sait pas au juste. — C'est, encore une fois, la montagne qui accouche d'une souris.

Et que dire des surprises incommensurables qui, peut-être, nous seront réservées dans cet ordre d'idées quand nous pénétrerons dans ce monde des transformations *intra-atomiques*[1] que le radium vient de nous faire entrevoir...

Avant de tout savoir et de tout pouvoir, comme elle s'en flatte trop aisément parfois, notre pauvre science humaine a encore à franchir de singulières étapes !

Attendons !

Emplois des accumulateurs. — Néanmoins, à défaut d'autre chose, les accumulateurs rendent de précieux services.

Indépendamment de leur faculté d'emmagasinement qui permet une meilleure utilisation du matériel des stations centrales (Voir p. 138), ils présentent une résistance intérieure très réduite, quelques millièmes d'ohm dans les grands éléments. Ceci explique bien la faveur de leur emploi comme *volant* dans les stations centrales. La batterie, chargée le reste de la journé, est placée pendant les heures d'éclairage en dérivation sur les dynamos et alimente le réseau concurremment avec elles. On obtient ainsi un ensemble qui représente une résistance intérieure extrêmement faible et, lorsque la demande de courant augmente, c'est la batterie qui pare à cette demande sans que le potentiel baisse sensiblement.

C'est un rôle analogue, en plus de son rôle d'accumulateur proprement dit, que la batterie joue dans l'installation d'éclairage de l'amateur, où elle est en dérivation sur la pile qui la charge constamment. Si l'on vient à faire varier le débit, par suite de l'allumage ou de l'extinction de quelques lampes, la résistance intérieure de

1. Voir plus loin : *le Radium et les nouvelles radiations.*

l'ensemble pile-accumulateurs étant très faible, les variations de la diff. de pot. sont insensibles, pour le plus grand bien de la fixité de l'éclairage.

Charge et manipulation. — Suivant l'état de charge des accumulateurs, leur diff. de pot. utile en débit varie entre 2 et 1,8 volt par élément. Quand cette diff. de pot. atteint 1,8 volt, c'est que la charge est à peu près épuisée.

Pour charger une batterie, il faut disposer d'une f. é. m. d'au moins 2,5 volts par élément en série. On effectue cette charge en reliant les pôles de la source [préalablement mise en marche et excitée (voir p. 202) si c'est une dynamo] aux pôles de *même nom* de la batterie d'accumulateurs. On doit intercaler un ampèremètre en circuit et on verra à ne pas dépasser un régime de charge supérieur à 1 ampère par kilogramme d'électrodes.

Dans le cas où on ne pourra pas disposer d'une f. é. m. assez élevée pour charger tous les éléments en série, on fera de ceux-ci 2 ou 3 séries égales qu'on couplera, pour la charge, en quantité. Ainsi, par exemple, on pourra charger à l'aide de 5 éléments au bichromate ($E = 10$ volts) 8 accumulateurs montés par 4 en tension et 2 en quantité. On disposera ainsi, en effet, de 2,5 volts par accumulateur. La charge terminée, ce qu'on reconnaîtra au dégagement abondant des gaz, on couplera les 8 accumulateurs en tension pour alimenter la canalisation et on disposera ainsi de 16 volts sur celle-ci.

Si la diff. de pot. entre les bornes d'un des accumulateurs vient à s'annuler, ce dont un examen judicieux passé de temps en temps à l'aide du voltmètre permettra de se rendre compte, il y aura de fortes présomptions pour un court-circuit causé par la chute d'une pastille ou le non-parallélisme des plaques.

Enfin, en ce qui concerne la charge et surtout la décharge, il y aura lieu de ne pas soumettre les accumulateurs à pastilles à des régimes exagérés, dépassant 1 à 2 ampères par kilogramme de plaque, afin d'éviter le *gondolement* de celles-ci.

Quand une batterie d'accumulateurs se gondole, il n'y a pas à rire !

GALVANOPLASTIE; DÉPÔTS ÉLECTROCHIMIQUES

Galvanoplastie. — Nous avons vu que, si l'on électrolyse une solution d'un sel métallique en employant comme anode une plaque du même métal qui se trouve en dissolution dans le *bain*, le passage du courant provoque le transport continu du métal de l'anode vers la lame métallique constituant la cathode.

Ceci ne paraît pas vous dire grand'chose.

A quoi bon, dites-vous, enlever du métal sur cette plaque et

l'amener sur cette autre? C'est certainement très fort comme exercice, mais cela ne nous sert pas à grand'chose. — Effectivement, mais il n'est pas très difficile de modifier un peu les conditions de l'expérience de manière que cela nous soit, au contraire, extraordinairement utile.

D'abord, cette électrode négative, nous savons que sa nature importe peu ; elle sera uniformément recouverte d'une couche de métal graduellement croissante pourvu qu'elle soit constituée par une matière conductrice. Or, elle peut être en gutta-percha et satisfaire tout de même à cette condition de conductibilité, si sa surface a été frottée, *métallisée*, à l'aide d'un pinceau imbibé de plombagine en poudre. Et, du moment que notre électrode est en gutta-percha, rien ne nous aura empêchés, avant le passage de la plombagine, de prendre avec cette gutta préalablement ramollie dans l'eau chaude l'empreinte d'une médaille, d'une pièce de monnaie, etc.

Ah! vous comprenez, maintenant : vous comprenez que nous aurons encore *tout simplement* transport d'une certaine quantité du métal de l'anode sur notre cathode en gutta, mais que par-dessus le marché, le métal déposé se sera incrusté dans notre moule, en aura reproduit tous les détails avec la plus scrupuleuse fidélité, de sorte qu'en dépouillant le métal du moule, auquel la plombagine l'empêche d'adhérer, nous obtiendrons une magnifique reproduction de notre médaille, et cela en quelque sorte *gratis pro Deo*, puisque théoriquement, ce résultat qui tient du merveilleux ne nous coûte pas d'énergie (p. 135).

Telle est la *galvanoplastie;* et, comme le hasard joue fort souvent un grand rôle dans l'histoire de la science, les gens bien informés prétendent que l'observation du dépôt de cuivre de la pile Daniell, reproduisant fidèlement les éraillures de l'électrode positive, n'a pas été étrangère à la découverte annoncée par Jacobi en 1838. Cela ne serait pas, au surplus, pour diminuer le mérite de son auteur : savoir observer, savoir tirer parti du fait en apparence le plus insignifiant est une tournure d'esprit qui ne court pas les rues.

La galvanoplastie se pratique en général avec une solution saturée de sulfate de cuivre, additionnée d'un peu d'acide sulfurique et placée dans une cuve de verre.

L'anode est une plaque de cuivre d'une grandeur un peu supérieure à la surface du moule. C'est généralement de la gutta-percha qui constitue ce dernier, mais très souvent aussi on prend l'empreinte avec de la stéarine, de la gélatine, de l'alliage fusible de Darcet. L'épreuve obtenue, préalablement plombaginée, est suspendue dans le bain par un fil de cuivre qui entoure le contour et qui est mis en relation avec le pôle négatif de la source. Le cuivre commence à se déposer dès que le circuit est fermé.

Les qualités de beauté et de solidité du dépôt dépendent essentiellement de la conduite du bain, un courant trop intense produi-

sant un dépôt noir, tandis qu'un dépôt trop lent est cristallin et cassant. Il faut, en outre, que le bain soit fréquemment agité pour conserver, pendant toute la durée de l'opération, une homogénéité nécessaire.

Quant à la source d'électricité, elle n'a pas besoin d'être de f. é. m. élevée, puisque nous savons qu'elle n'a à vaincre que les résistances passives du circuit. Sa principale qualité doit être la constance, l'opération se prolongeant pendant plusieurs heures. La pile au sulfate de cuivre, genre Daniell, satisfait fort bien à ces conditions.

On peut également recommander la pile au bichromate à deux liquides.

Mais, si intéressants que soient les résultats obtenus dans la reproduction des médailles, ce sont là enfantillages pour les galvanoplastes d'aujourd'hui, qui s'attaquent à des problèmes bien plus difficiles, comme la reproduction en une seule pièce de statues de dimensions respectables et du plus bel effet artistique.

Les applications de la galvanoplastie à d'autres industries ne sont pas moins intéressantes. Par exemple, elle apporte aux procédés de la gravure des ressources précieuses :

Rien de plus simple que de transformer en un cliché prêt au tirage un dessin tracé par la pointe du graveur sur la cire recouvrant une planche de cuivre. On porte la plaque dans le bain de sulfate de cuivre en la reliant au *pôle positif :* elle joue donc ici le rôle d'anode; le métal se dissout partout où la pointe de l'artiste l'a mis à nu et le dessin tracé sur la cire est bientôt représenté en creux dans le cuivre de la façon la plus fidèle.

C'est d'une façon analogue que l'on applique la galvanoplastie aux gravures sur bois. Autrefois, on tirait les épreuves sur le bois lui-même : cela ne pouvait durer longtemps et le cliché était vite hors d'état. Maintenant, on coule de la gutta-percha sur le bois : elle reproduit la gravure dans ses détails les plus ténus; puis on fait un dépôt galvanoplastique, que l'on consolide en y coulant un alliage approprié. On obtient ainsi un cliché, reproduction exacte du bois, mais beaucoup plus dur; il permet de tirer sans difficulté jusqu'à 80.000 épreuves. Si ce cliché vient cependant à s'user lui aussi, le bois est toujours là pour permettre d'en refaire de nouveaux.

La fidélité de reproduction des procédés galvanoplastiques est si extraordinaire, au reste, que l'on transpose à leur aise sur des clichés d'imprimerie les vues photographiques les plus délicates.

Dorure, argenture, nickelage. — Mais nous pouvons demander à notre courant véhiculeur de particules métalliques, je ne dirai pas *mieux*, mais bien d'autres choses encore.

Nous pouvons, par exemple, lui demander d'exercer ses effets sur la solution d'un sel d'or. Si alors nous suspendons à la cathode les

objets métalliques ou métallisés les plus vulgaires, cuillers, fourchettes, cristaux, l'anode étant constituée par une plaque d'or, le métal précieux viendra recouvrir ces objets d'une couche brillante et trompeuse. Telle est la *dorure* galvanique, moyen le plus sûr qu'on connaisse jusqu'à présent — en dépit de tous les *argentaurums* du monde — pour muer en or du fer ou de l'étain.

Il est vrai que cet or n'est même pas du *doublé*, car le prix du métal déposé sur la cuiller à café de l'aspect le plus riche ne dépasse guère... 35 centimes.

Mais, par exemple, considérable est le travail, multiples sont les précautions nécessitées par la dorure, et le prix de l'or n'est qu'un bien faible facteur devant celui de la manipulation :

Les objets à dorer doivent tout d'abord être débarrassés de la couche de graisse qui les recouvre toujours — rappelez-vous l'aiguille *nageuse* de notre boussole — et qui s'opposerait à l'adhérence et même au dépôt de l'or. On les plonge d'abord dans une solution de soude, puis dans l'eau pure, ensuite dans un bain acide, dit bain de *dérochage :* après cela, on les lave et on les brosse énergiquement. Enfin, pour assurer l'adhérence du dépôt, on les passe encore dans deux bains acides très corrosifs, dits bains de *blanchiment.* On les lave une fois de plus et on les porte à la dorure en évitant de les toucher — même avec des gants — de peur de les salir.

Pour quelques métaux même, tout ceci ne suffirait pas à rendre le dépôt d'or adhérent, et il faut commencer par les recouvrir galvaniquement d'une couche de cuivre ou d'argent.

Le bain est constitué par une solution d'environ 2 grammes d'or par litre sous forme de chlorure, additionné de cyanure de potassium. La conduite du bain nécessite toutes sortes de précautions et de tours de main, le dépôt pouvant être plus rapide et se terminer en une demi-heure si le bain est chauffé vers 70°.

Est-ce tout, au moins? Que non! Au sortir du bain, l'objet présente un aspect terne, qui ne laisse rien présager de l'apparence brillante à laquelle nous sommes accoutumés. Il faut le soumettre à un *gratte-bossage* énergique à l'aide d'une brosse en fils souples de laiton, puis on doit le faire passer à une opération chimico-physique qu'on appelle la *mise en couleur* et qui précède le *brunissage*, écrasement des particules métalliques à l'aide d'un outil d'acier ou d'agate, qui donne enfin à l'objet son aspect définitif.

Le tout sous réserves d'oublis.

On conçoit que le décigramme d'or déposé sur une cuiller à café ne pèse pas lourd devant ce déluge de manipulations.

C'est d'une façon analogue que l'on recouvre les métaux d'une couche d'*argent.* La préparation des objets est la même. Le bain est une solution de 25 grammes de cyanure d'argent par litre, additionné de cynanure de potassium. 4 éléments Bunsen suffisent à déposer en 4 heures — à condition d'aller vite — 500 grammes d'argent sur 5.000 cuillers.

Le *nickelage* est aussi une industrie analogue qui, par suite de l'inaltérabilité du nickel et de son bel aspect, a pris un développement important. Le nickelage s'effectue par l'électrolyse d'une solution de sulfate double de nickel et d'ammoniaque à 50 grammes par litre, avec, naturellement, l'anode soluble en nickel.

On dépose encore bien des métaux dans des buts différents.

Ne s'agit-il que de cuivrer des objets, on peut appliquer la remarque que nous avons faite en parlant de la pile Daniell (Voir p. 37) où nous avons vu le cuivre se déposer sur l'électrode positive. Si l'on constitue cette électrode par les objets à cuivrer, cuillers, etc., on aura donc réalisé un appareil représentant à la fois une cuve galvanoplastique et une pile dont l'énergie pourra être employée à quoi l'on voudra. Si on ne juge pas à propos d'utiliser ce *sous-produit*, comme il faut néanmoins que la *pile* débite pour que le cuivre se dépose, on mettra ses deux pôles en court-circuit. C'est la disposition indiquée dans la figure 79.

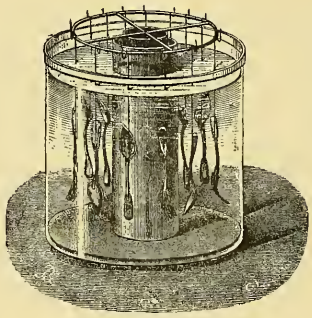


Fig. 79. — Appareil simple pour la galvanoplastie.

D'ailleurs, la puissance des procédés galvaniques ne connaît pas de limites, ne se laisse arrêter par aucun obstacle. On argente, on dore jusqu'à des fruits! On plonge chaque fruit dans une solution alcoolique de nitrate d'argent, puis on l'expose aux émanation sulfureuses : il se forme une couche noire et conductrice de sulfure d'argent. On porte alors le fruit dans une solution galvanique et on y amène le courant à l'aide d'une épingle : il ne tarde pas à se recouvrir d'une enveloppe métallique qui en reproduit tous les détails, même le duvet! On peut de la même façon recouvrir d'une riche enveloppe des insectes, des fleurs, des végétaux, et obtenir des bouquets métalliques d'une conservation indéfinie et de l'aspect le plus gracieux.

On a doré jusqu'à des robes de bal, et la robe de la richesse la plus invraisemblable contenait tout juste quelques centimes de métal!

Raffinage électrique des métaux. — Le transport de métal de

l'anode à la cathode d'un bain galvanoplastique a été encore mis à profit d'une façon bien différente.

On a remarqué que si l'anode d'un bain est constituée par un métal incomplètement raffiné, tenant dans sa masse des impuretés, ces impuretés n'accompagnent pas le métal dans sa migration vers le pôle négatif, mais tombent sous forme de boue au fond du récipient.

A la cathode se dépose donc un métal absolument pur, et l'on a évité ainsi les opérations chimiques compliquées et coûteuses qui eussent été nécessaires sans cela. Car, il ne faut pas l'oublier, ce transport d'une électrode à l'autre, l'électricité le fait en se jouant, sans presque de dépense d'énergie. Aussi a-t-on mis à profit industriellement cette remarque, et le raffinage électrique du cuivre et du plomb s'effectue actuellement dans plusieurs grandes usines.

On peut citer particulièrement en France l'usine de Dives, qui utilise les procédés Elmore et Secrétan.

PRÉPARATION DES PRODUITS CHIMIQUES

Nous n'avons vu jusqu'à présent que les applications industrielles qui résultent du principe fécond de l'anode soluble. Mais d'autres industries se sont fondées qui mettent à profit l'électrolyse proprement dite, dans le but de séparer et de recueillir les produits résultant de cette électrolyse.

Sans doute, il ne s'agit plus ici d'opérations effectuées pour ainsi dire gratuitement par l'électricité. Au contraire, elles nécessitent une dépense énorme d'énergie et il est bien certain que si l'ingénieur n'avait à sa disposition, comme outil producteur du courant, que la pile électrique, les industries en question eussent été bien en peine de se créer, alors que la galvanoplastie et ses dérivés n'en eussent guère été moins florissants.

Heureusement, nos ressources ne sont pas aussi limitées. Si la pile demande pour son alimentation de l'énergie chimique coûteuse, la dynamo, nous l'avons déjà dit, ne réclame que de l'énergie mécanique. Or, cette énergie mécanique, l'eau qui coule dans nos fleuves, les torrents qui grondent dans nos montagnes nous en offrent des trésors incessamment renouvelés que nous commençons à utiliser, en attendant que nous nous adressions à cette source d'énergie bien autrement formidable encore, l'Océan.

Aussi, à l'heure actuelle déjà, des dizaines de milliers de chevaux sont empruntés aux chutes d'eau à l'aide de puissantes turbines, et transformés en énergie électrique dans de gigantesques dynamos.

Ici, cette énergie est employée à l'électrolyse du sel marin — chlorure de sodium — et livre la *soude* et le *chlore* qui en résultent

à des prix auxquels les procédés purement chimiques ne peuvent prétendre.

Là, comme à Vallorbes, on utilise des réactions électrochimiques un peu plus complexes, qui transforment en *chlorate de potasse* le chlorure de potassium, en *permanganate de potasse* les sels de manganèse, et tirent des clous de girofle le suave parfum de la *vanille*.

Ailleurs, c'est l'alumine qu'on électrolyse, préalablement dissoute à haute température dans le fluorure double d'aluminium et de sodium (procédés de Hall, d'Héroult, etc.). Ces procédés fournissent déjà par milliers de tonnes annuellement l'*aluminium*, ce métal extraordinaire qui est l'âme de l'argile, de la vulgaire terre glaise, et qui est en train de prendre une si grande place dans la métallurgie.

Des moyens analogues fournissent le *magnésium*, autre métal plus extraordinaire encore, puisqu'il s'enflamme dans l'air en répandant une flamme éblouissante, utilisée par les amateurs de photographie nocturne à court d'électricité, le *calcium*, utile en métallurgie, et le *fer* lui-même, si bas que soit le coût de sa fabrication par les procédés habituels.

D'autres usines électrochimiques ont pour but, par la réduction à haute température de la chaux par le charbon, la préparation du *carbure de calcium*, ce composé singulier qui, jeté dans l'eau, donne naissance à ce gaz d'un merveilleux pouvoir éclairant, l'*acétylène*. Mais ici, ce n'est plus du tout à titre d'agent de décomposition que l'électricité intervient. C'est, au contraire, pour provoquer l'union du calcium de la chaux avec le charbon en fournissant ce qu'elle seule sait fournir jusqu'à ce jour, la température énorme nécessaire pour provoquer cette combinaison.

Le *carborundum*, substance qui fait concurrence au diamant sous le rapport des applications industrielles, et qui est une combinaison cristallisée de carbone et de silicium — deux corps bien vulgaires encore, puisque le premier n'est autre que le charbon et que le second est le constituant essentiel du sable — résulte d'une action du même genre et est extrait en quantités importantes de cette merveilleuse mine moderne, le four électrique.

D'ailleurs, sous les efforts de M. Moissan et de ses imitateurs, le *diamant* lui-même a révélé dans le four électrique le secret de sa formation. Certes le *Régent* n'a pas encore lieu d'être jaloux des minuscules produits de M. Moissan, mais, au train dont vont les choses, il n'a déjà plus qu'à se bien tenir !

Si nous ajoutons que demain l'azote et l'oxygène de l'air, fixés par l'étincelle électrique, livreront à l'agriculture les quantités immenses de *nitrates* nécessaires à ses besoins, que l'*ozone*, précieux pour les industries du blanchiment et pour la stérilisation des eaux, est produit aisément par l'électrisation de l'air ou de l'oxygène, nous aurons une idée des principaux services que nous rend l'électrochimie-encore à ses débuts.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

CHAPITRE DOUZIÈME

L'INDUCTION MAGNÉTIQUE

Relations entre l'électricité et le magnétisme. — Voici, sur une table, une pile et un aimant.

Ce sont deux objets bien différents, qu'il ne vous viendrait certainement pas à l'idée de supposer unis par les liens de famille les plus étroits.

Et, cependant, il en est ainsi.

D'abord, souvenez-vous de l'action mystérieuse que le courant issu de notre pile exerce sur l'aiguille aimantée, qui n'est en somme qu'un petit aimant (p. 16).

Ensuite, plongez dans de la limaille de fer un conducteur reliant les deux bornes de la pile : la limaille s'y attache ; ce fil l'attire comme le ferait un aimant !

Ou bien encore, enroulez ce fil en une hélice, une bobine d'un nombre de tours assez grand ; introduisez dans le vide laissé suivant l'axe une tige d'acier ; lancez le courant à travers les spires ; cette tige d'acier, quand vous la retirez, est devenue un aimant !

Nous verrons encore bien d'autres analogies entre les deux ordres de phénomènes. Au fond, comme l'a affirmé Ampère à la suite d'une série de magistrales expériences, magnétisme et électricité ne font qu'un, et c'est cette identité, exploitée comme aucune mine ne le fut, qui va nous fournir les applications les plus étonnantes de l'électricité.

Vers 1820, la découverte d'Œrsted (p. 15) avait excité dans les milieux scientifiques la plus vive émulation. Des recherches importantes se poursuivaient de tous côtés avec activité. Elles aboutirent à cette constatation fondamentale d'Arago que, de même que le courant agit sur l'aiguille aimantée à l'égal d'un véritable aimant, il peut aussi, comme un aimant, attirer le fer. Et, en effet, en plongeant un fil métallique parcouru par un courant dans de la limaille de fer, Arago l'avait retiré couvert de limaille.

Ampère, mis au courant par Arago de cette expérience, pensa immédiatement que, puisqu'en enroulant le fil sur lui-même on augmentait son action sur l'aiguille aimantée (Schweigger venait de découvrir les propriétés du *multiplicateur*), il était fort probable qu'on devait de la même façon

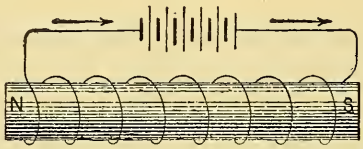


Fig. 80. — Aimantation du fer par le courant.

augmenter aussi les effets d'aimantation. Une tige de fer fut donc enroulée de spires nombreuses de fil isolé (*fig.* 80) dans lesquelles un courant fut lancé. La tige de fer, pendant tout le temps du passage du courant, se montra capable de soulever des morceaux de fer d'un poids considérable, qui — constatation capitale — se détachaient dès que le courant était interrompu.

L'*électro-aimant* était découvert !

Ampère fit encore une observation intéressante : tandis que la tige de fer perdait son aimantation dès la cessation du courant, l'aimantation d'une tige d'acier, au contraire, persistait indéfiniment.

On avait donc là le moyen de fabriquer artificiellement des aimants permanents.

Ainsi, dès les premiers travaux d'Arago et d'Ampère, le lien entre l'électricité et le magnétisme, aperçu par Œrsted, se dessine et s'affirme. Non seulement l'électricité est suscep-

tible d'influencer à distance l'aiguille aimantée, mais elle se montre capable *d'engendrer par elle-même des effets magnétiques*. Que faut-il de plus pour mettre hors de doute cette communauté d'origine? prendre le contre-pied de cette proposition et montrer qu'à leur tour les aimants sont capables *d'engendrer des effets électriques*.

COURANTS INDUITS PAR LES AIMANTS
CHAMP MAGNÉTIQUE

Colladon contre Faraday. — C'est l'illustre Faraday qui, en 1832, se chargea de la démonstration.

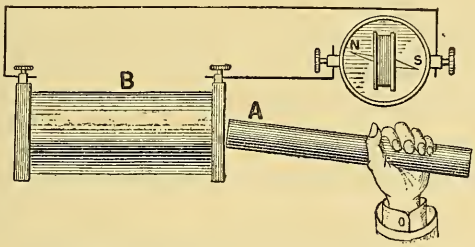


Fig. 81. — Faraday découvre l'induction.

— Il est bien entendu, se dit Faraday, que, si nous plaçons un barreau de fer ou d'acier à l'intérieur d'une bobine, ce barreau s'aimante dès qu'un courant traverse la bobine. Mais est-ce que par hasard le contraire ne serait pas possible ? Est-ce que, en plaçant à l'intérieur d'une bobine un aimant, on ne donnerait pas naissance à un courant?

Qu'eussiez-vous fait à la place de Faraday? Vous eussiez tenté l'expérience, expérience bien simple, puisqu'il suffisait de relier la bobine à un galvanomètre et d'approcher l'aimant (*fig.* 81). C'est ce que fit Faraday, et, à sa grande satisfaction, il vit l'aiguille du galvanomètre *dévier fortement*.

La satisfaction de Faraday était justifiée : il venait d'empocher son plus beau titre de gloire en découvrant l'INDUCTION.

Mais il l'avait échappé belle!

Quelques mois auparavant, un jeune physicien de Genève manipulait avec ardeur galvanomètres et bobines de fil, comme beaucoup d'autres savants de ce temps-là. Lui aussi s'était dit que puisque les courants électriques engendraient le magnétisme, le magnétisme, à son tour, pouvait peut-être engendrer l électricité. Et lui aussi cherchait la preuve.

Un jour, donc, il prépara exactement l'expérience que devait effectuer Faraday quelques mois plus tard, plaça un galvanomètre dans le circuit de sa bobine et y introduisit l'aimant. Rien !... il tourna, retourna l'aimant de trente-six façons différentes : Toujours rien !...

Après quelques heures de cet exercice, dépité, il planta là son expérience, persuadé que son flair, en fait d'induction, l'avait tout simplement induit... en erreur.

Ce jeune expérimentateur n'était autre que le futur célèbre physicien Colladon, mort ces dernières années, et on juge de sa déconvenue, quelque temps après, à l'annonce de la découverte de Faraday et de l'enthousiasme qui l'accueillit !

Comment donc un observateur aussi attentif, aussi avisé que Colladon avait-il pu aboutir à un résultat semblablement piteux ? Qu'était-il arrivé ? Il était arrivé tout simplement ceci, que l'aiguille du galvanomètre avait bien remué, mais que Colladon n'y avait rien vu !

Et il y avait à cela une raison.

A cette époque lointaine, Colladon était encore presque un inconnu : son laboratoire était petit et il lui fallait faire ses travaux seul, sans le plus modeste assistant. Faute de place et aussi pour soustraire l'aiguille du galvanomètre à l'action directe de l'aimant, il avait dû installer le galvanomètre dans la pièce voisine de celle où se trouvait la bobine.

Or, l'expérimentateur était persuadé que, de même que l'aimantation produite par le courant dure autant que le courant, de même le courant produit par l'aimant — à supposer qu'il y en ait un — devait persister autant que la présence de l'aimant dans la bobine. Lorsqu'il avait introduit l'aimant dans la bobine, Colladon s'en allait donc tranquillement dans la pièce voisine observer le galvanomètre, dont l'aiguille, à ce moment, était déjà revenue au repos.

Comme les carabiniers célèbres, il arrivait toujours trop tard !

Si Colladon avait pu se douter que les courants *induits* sont *instantanés*, qu'ils ne peuvent, nous allons nous en convaincre, se produire qu'aux dépens de l'énergie empruntée à la main qui déplace l'aimant et doivent donc cesser avec le mouvement qui les engendre, il se fût un peu plus dépêché pour aller voir son galvanomètre, il fût arrivé avant que l'aiguille ait cessé d'osciller. Le plus beau titre de gloire de Faraday aurait appartenu à un autre et le micro*farad* se serait appelé le micro*colle*, pour la plus grande jalousie des bactériologistes et de leurs microcoques.

Et il faut bien, de toute nécessité, que les courants induits possèdent le caractère d'instantanéité qui avait échappé à Colladon.

Si, en effet, on enfonce dans la bobine induite et qu'on retire alternativement l'aimant un très grand nombre de fois, on pourra produire des quantités considérables d'énergie électrique, qui se dépenseront en chaleur dans le circuit : or, après cette expérience, aussi prolongée qu'on le veut, on n'observe *aucune* modification, magnétique ou autre, dans l'état du barreau aimanté ; ce ne peut donc être à de l'énergie empruntée à ce barreau qu'est due l'énergie électrique constatée : il est alors évident que celle-ci ne peut être empruntée qu'à la seule source d'énergie qui entre en jeu, c'est-à-dire à l'expérimentateur.

Si nous disposions d'instruments assez sensibles, nous verrions, en effet, que, pour introduire le barreau dans la bobine ou l'en retirer, il nous faut déployer un *certain effort*, d'autant plus grand, d'ailleurs, que la bobine est fermée sur une résistance plus faible, parce que les *courants induits* qui prennent naissance dans le circuit sont alors plus intenses, ce qui augmente la puissance absorbée.

Ainsi, le déplacement des aimants par rapport aux circuits métalliques fermés nous donne un moyen extrêmement commode de transformer de l'énergie *mécanique* en énergie *électrique*.

C'est sur ce principe que sont fondées toutes les machines électriques industrielles.

Mais, avant d'aborder l'étude de celles-ci, nous essaierons de nous rendre compte de quelle manière se produisent ces courants d'induction.

Quant aux effets magnétiques des courants, nous n'y insisterons pas plus pour l'instant, en ayant assez dit pour qu'il soit possible de consacrer le chapitre pratique suivant à l'étude de quelques-unes des applications de l'électro-aimant.

Champ magnétique ; lignes de force. — Puisque les aimants, tant naturels qu'artificiels, jouent un si grand rôle en électricité, il est assez naturel que nous leur consacrions quelques instants d'attention.

Vous savez par expérience — car tout le monde a eu des aimants entre les mains — que toute la région qui avoisine un aimant est dans un état bien particulier.

Un morceau de fer placé dans cette région est attiré vers l'aimant quand bien même un obstacle l'en sépare, lame de verre ou feuille de carton.

On dit que l'objet est dans le *champ magnétique* de l'aimant et c'est là encore un nom de baptême calqué sur le langage populaire, car on dit communément que telle chose ou telle affaire est *dans le champ d'action* de telle personne.

L'étude de ce champ magnétique est essentielle, car c'est à l'existence de cette région alentour de l'aimant que sont dus les phénomènes électriques d'induction que nous avons eu et aurons à constater.

Si cette région est douée de propriétés si particulières, on admet que c'est parce qu'elle est sillonnée de filets immatériels appelés *lignes de force*, jouissant de propriétés magnétiques et se dirigeant, à travers l'air, du pôle nord au pôle sud de l'aimant.

Fantômes magnétiques ; le circuit magnétique. — Disons, d'ailleurs, qu'on a fait mieux que d'imaginer ces filets immatériels et de leur donner un nom. On les a mis en quelque sorte en évidence.

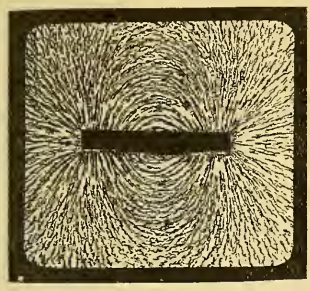
L'xepérience est assez intéressante et assez simple à la fois pour que nous la répétions.

Elle consiste (*fig.* 82) à placer l'aimant sous une feuille de

carton et à saupoudrer celle-ci de limaille de fer en donnant quelques secousses. La limaille est ainsi soumise à l'attraction de l'aimant; mais, au lieu de la voir se grouper d'une façon quelconque au voisinage des pôles, ainsi que vous vous y attendiez, vous constatez qu'elle se rassemble en filets formant des courbes bien régulières allant d'un pôle à l'autre.

Ces lignes ne sont autre chose que la trajectoire des lignes de force rendue visible.

Telle est l'expérience des *fantômes magnétiques*, qu'il est facile de fixer sur la feuille de carton, préalablement gommée, en y pulvérisant un peu d'eau.



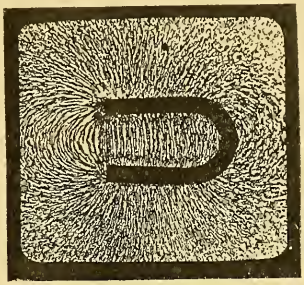


Fig. 82 et 83. — Fantômes magnétiques d'un aimant droit et d'un aimant en fer à cheval.

La figure 83 représente le fantôme magnétique non plus d'un barreau aimanté droit, mais d'un aimant en fer à cheval.

Toutes les lignes de force, sans exception, vont d'un pôle à l'autre après avoir parcouru dans l'espace un trajet plus ou moins long. Il serait facile de le voir en prenant, pour faire l'expérience précédente, une feuille de carton plus grande.

On a été amené à considérer ces lignes de force comme le résultat d'une circulation analogue à celle du circuit électrique : on admet que les lignes de force partent du pôle nord de l'aimant, franchissent l'air par une trajectoire plus ou moins allongée, gagnent le pôle sud, et, de là, se dirigent vers le pôle nord à travers l'aimant. On a appliqué au *circuit magnétique* ainsi constitué des considérations tout à fait analogues à celles du circuit électrique; d'où la notion de *force magnétomotrice*,

cause du *flux magnétique* comme la force électromotrice est la cause du courant ou flux électrique, et la notion de *résistance magnétique* opposée au passage du flux, résistance qui est infiniment plus grande dans l'air que dans le fer, dont la *perméabilité* magnétique, on ne sait trop pourquoi, est excellente[1]. Nous n'insisterons pas sur ces considérations, mais elles nous suffisent pour concevoir que les lignes de force, à leur sortie du pôle nord, choisissent de préférence le chemin le plus court pour rentrer au pôle sud. Le fantôme magnétique (*fig.* 82) d'un barreau en fer à cheval, en effet, démontre bien que les lignes de force y sont surtout pressées entre les deux branches, au voisinage des pôles.

Fig. 84.

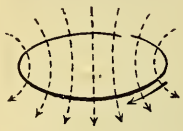


Fig. 85.

Fig. 84. — Champ magnétique produit par un fil F traversé par un courant.
Fig. 85. — Champ magnétique produit par une spire traversée par un courant.

Champs magnétiques produits par les courants. — Fait capital, et qui ne vous étonnera plus, maintenant que vous connaissez les effets magnétiques dont les circuits traversés par un courant électrique sont capables (p. 155), ces circuits donnent toujours naissance à des *champs magnétiques exactement analogues* à ceux des aimants, et dont les lignes de force présentent une forme en rapport avec la forme même de ces circuits.

Ainsi, le champ magnétique créé par un fil droit parcouru par un courant est constitué par des lignes de force circulaires enveloppant le fil (*fig.* 84).

Une spire de fil donne le champ indiqué figure 84.

Une bobine allongée donne un champ tout à fait semblable à celui d'un aimant droit, comme le montre à pre-

1. De même que l'air, le bois, le verre et, en général, toutes les substances sont perméables au flux magnétique : les lignes de force traversent avec une facilité relative toutes ces substances.

mière vue la comparaison des figures 82 et 86. D'ailleurs, en toutes circonstances une telle bobine se comporte au point de vue magnétique exactement comme un barreau droit aimanté et lui est équivalente. Réciproquement, un barreau aimanté

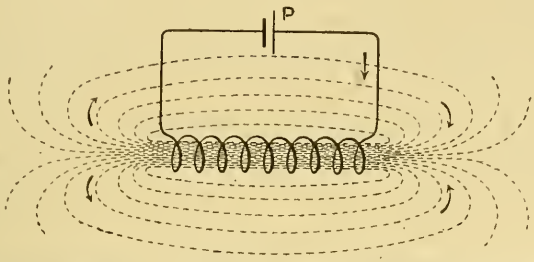


Fig. 86. — Champ magnétique produit par une bobine longue traversée par un courant.

peut être assimilé à une bobine longue traversée perpétuellement par un courant.

Déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique. — Tirons de tout cela des conséquences pratiques.

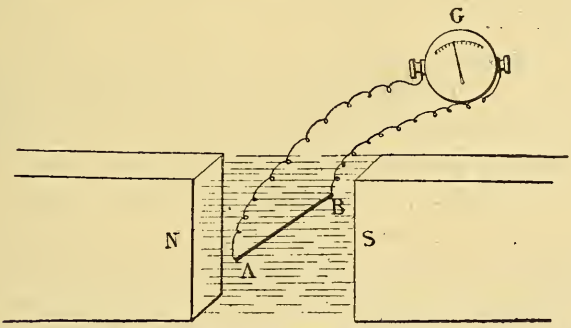


Fig. 87. — Induction dans un conducteur qui se déplace dans un champ.

Prenons un système aimanté fournissant entre les pôles N, S, un champ magnétique (*fig.* 87). Plaçons dans ce champ, perpendiculairement à sa direction, un conducteur AB relié à un galvanomètre. Déplaçons ce conducteur de manière à *couper* les lignes de force que nous a révélées le fantôme magnétique. Le galvanomètre nous indique qu'*un courant*

se produit et persiste tant que le conducteur *coupe* des lignes de force, tant qu'il se déplace au voisinage de l'aimant.

Et, en effet, les lignes de force opposent une certaine résistance mécanique au passage d'un conducteur faisant partie d'un circuit *fermé*. Elles se comportent comme si elles étaient de vrais filets matériels, et on est obligé, pour les *couper* en faisant avancer le conducteur à travers ce milieu résistant, de le pousser, en dépensant une énergie qui, ainsi que le gavalnomètre est là pour l'indiquer, est immédiatement transformée en électricité dans le circuit électrique. Mais si le circuit auquel le conducteur appartient est ouvert, il ne peut plus s'y dépenser de courant, et on constate justement par l'expérience que le conducteur n'éprouve plus alors aucune résistance à traverser le champ magnétique. *Toute* la résistance qu'il éprouvait lorsque le circuit était fermé provenait donc de l'absorption d'énergie électrique dans le circuit. Voilà ce que nous apprend l'expérience.

Si l'obstacle opposé au déplacement du conducteur dépend bien en réalité de la nécessité de rompre des lignes de force, elle doit nous apprendre aussi, cette expérience, que l'obstacle est d'autant plus grand que les lignes de force sont plus nombreuses, plus resserrées.

C'est, nous l'avons dit, entre les branches d'un électroaimant que cette abondance est la plus grande : eh bien ! si nous faisons partir notre conducteur d'entre les branches du fer à cheval et que nous l'amenions à une vitesse régulière jusqu'à la région où le fantôme magnétique nous a montré que les lignes de force étaient très rares, le galvanomètre nous indique un courant qui, maximum lorsque le conducteur passait entre les deux pôles, là où les lignes de force sont le plus nombreuses, va en diminuant régulièrement à mesure que nous nous éloignons, que nous avons à rompre moins de lignes de force.

La démonstration est donc parfaite.

Vous concevez également que plus le conducteur se déplacera *rapidement* à travers le champ, plus il coupera à chaque instant de lignes de force. Notre galvanomètre nous indique en effet que, plus notre conducteur se déplace rapidement,

plus le courant produit est énergique. En un mot, la force électromotrice induite par l'aimant sur le conducteur est d'autant plus grande que le nombre de lignes de force coupées dans l'unité de temps est plus grand.

Remarquez qu'il faut encore, pour que le nombre des lignes coupées soit grand, que le conducteur se déplace le plus possible *perpendiculairement* à leur direction, car, s'il se déplaçait dans leur direction, il ne les couperait pas.

Vous ne serez pas étonné, après ces considérations, d'apprendre que, dans les dynamos, où on se propose d'obtenir des effets électriques très grands, on fait déplacer *très vite* des conducteurs dans des champs *très intenses*.

Autre chose encore, aussi facile à comprendre. Le conducteur que nous faisons déplacer dans le champ magnétique à travers les lignes de force en coupe évidemment d'autant plus qu'il est *plus long*. S'il a seulement 1 centimètre de long par exemple, il ne coupera que peu de lignes de force, même s'il se déplace très vite dans un champ très intense. Nous serons donc conduits à prendre un conducteur très long pour augmenter les effets produits, pour augmenter la puissance mécanique que nous pouvons transformer en énergie électrique. Mais le champ produit par notre aimant, par notre système *inducteur*, comme on dit, a forcément des dimensions très restreintes, ou plutôt n'est intense que dans une faible région; en allongeant le conducteur, ses extrémités arrivent donc dans une région où les lignes de force sont très clairsemées, et ne servent alors presque à rien.

Nous devrons, par suite, ramasser tout notre conducteur dans la région où le champ est très intense, et ceci nous permet de pressentir que les enroulements sous forme de *bobines* vont encore jouer ici un rôle considérable.

Dernière remarque, enfin, d'une importance capitale. Si nous coupons d'abord les lignes de force dans un certain sens. par exemple en approchant le conducteur vers l'aimant et l'amenant entre les branches du fer à cheval, nous produisons un courant d'un certain sens[1]. Mais, dès que nous revenons en

1. Il existe, pour déterminer ce sens du courant, une règle empirique d'une

arrière, la déviation du galvanomètre change de sens brusquement, nous indiquant que le courant est maintenant *inverse* de ce qu'il était auparavant. Et si nous continuons à faire déplacer alternativement notre conducteur dans un sens, puis dans l'autre, le circuit sera parcouru alternativement par des courants de sens inverses, ou, comme on dit, par un *courant alternatif*.

---

application fort simple : C'est la règle dite *des trois doigts*, imaginée par Fleming. Figurez par l'index de la main droite la direction des lignes de force du champ, par le médius le conducteur qui se déplace dans ce champ, par le pouce la direction dans laquelle on tire le conducteur. Le courant produit ira, dans celui-ci, dans le sens indiqué par le médius, qui figure ainsi, non seulement le conducteur, mais aussi le sens du courant qui y circule. Toutes les particularités indiquées ci-dessus pour ce sens du courant se retrouvent bien ici.

Par exemple, si, conservant la même direction du champ, c'est-à-dire de l'index, on veut voir ce qui advient si on tire le conducteur en sens inverse, il faut faire

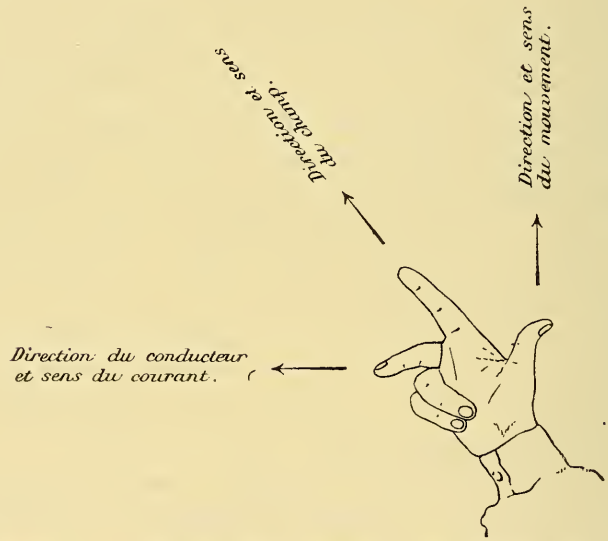


Fig. 88. — Règle des trois doigts. Cas de la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique.

tourner la main, par une rotation du poignet, de manière que le pouce, qui était dirigé vers le haut, vienne maintenant vers le bas ; et on voit alors que le médius est maintenant orienté vers la droite et non plus vers la gauche, ce qui veut dire que le courant a changé de sens dans le conducteur.

On voit aussi que si on suppose changé le sens des lignes de force du champ, ce qui revient à tourner l'index en sens contraire, et si on tire toujours le conducteur vers le haut, le médius s'orientera encore vers la droite, ce qui veut dire que quand on inverse le champ, on inverse aussi le courant produit par un déplacement donné.

Ce courant présente des propriétés bien différentes de celui de la pile, mais son étude est bien plus difficile. Nous consacrerons plus loin quelques pages à l'étude de ses curieuses propriétés. Pour le moment, nous ne nous occuperons que de voir quels artifices on a employés pour faire produire aux phénomènes d'induction des courants continus analogues à ceux de la pile.

Disons encore, avant de terminer, qu'on a coutume d'exprimer les résultats auxquels nous venons d'arriver sous une forme plus commode.

Le conducteur que nous déplaçons dans le champ constitue, avec le réseau sur lequel il débite, un circuit fermé embrassant un certain nombre de lignes de force du champ, un certain *flux*, suivant l'expression consacrée. Si on le déplace dans un sens tel que la surface circonscrite par le circuit augmente, le nombre des lignes de force comprises dans le circuit, ou *flux* embrassé, *augmente* naturellement aussi, et nous savons que ce déplacement se traduit par la production d'un courant d'un certain sens. Si on déplace le conducteur en sens contraire, la surface que le circuit présente au champ magnétique diminue, le nombre des lignes de force embrassées *diminue* également, ce qui se traduit par la production dans le circuit d'un courant de sens *inverse*.

On fait alors porter l'interprétation de ces phénomènes, non plus sur le nombre des lignes de force *coupées*, mais sur la *variation* du nombre de lignes de force *embrassées* — ce qui revient exactement au même, mais ce qui permet d'exprimer sous une forme commode que la f. é. m. induite dans un circuit qui se déplace dans un champ est à chaque instant proportionnelle *à la variation du flux embrassé*. En outre, le *sens* de cette f. é. m., c'est-à-dire le sens du courant qu'elle peut produire, dépend aussi du sens de la variation.

Cette petite modification n'a l'air de rien. Elle permet pourtant de comprendre sans commentaires certains faits qu'il serait long d'expliquer autrement.

Ainsi, un anneau conducteur qui se déplace dans un champ uniforme *parallèlement à lui-même* n'est le siège d'aucun courant, bien qu'il coupe énormément de lignes de force : seule-

ment, aux lignes coupées en avant correspondent des lignes coupées en arrière et ces deux effets se neutralisent, parce qu'ils produisent deux f. é. m. égales et opposées dans les deux parties du conducteur. Or, au lieu de tous ces beaux raisonnements, on peut se rendre compte immédiatement qu'il doit en être ainsi, car la surface que l'anneau présente au champ reste toujours la même dans sa translation, ainsi par conséquent que le nombre total des lignes de force embrassées, puisque le champ est supposé uniforme. Donc, pas de *variation de flux*, partant, pas de f. é. m. effective.

On voit immédiatement aussi qu'une spire qui tourne rapidement autour d'un de ses diamètres dans un champ est le siège de courants très énergiques, car le flux qu'elle embrasse varie à chaque instant.

D'ailleurs, cette formule présente encore cet autre avantage qu'elle est plus générale, car une variation du flux embrassé peut n'être pas causée par le déplacement du circuit dans le champ, mais encore par une variation dans l'intensité du champ embrassé.

Par exemple, si nous approchons un morceau de fer d'un aimant placé dans une bobine, nous modifions la résistance magnétique et changeons le parcours des lignes de force. Donc nous faisons *varier* le flux à l'intérieur de la bobine et nous produisons un courant.

RÉSUMÉ

Les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques présentent les liens de parenté les plus étroits: Le courant électrique est capable de produire des effets magnétiques, action sur l'aiguille aimantée, attraction de la limaille de fer par un conducteur traversé par un courant, aimantation temporaire d'une tige de fer placée à l'intérieur d'une bobine traversée par un courant (*électro-aimant*). De son côté, l'aimant est capable de produire des effets électriques: *induction* d'un courant dans une bobine par l'introduction d'un aimant à l'intérieur de cette bobine. Ce courant d'induction est produit aux dépens de l'énergie de la cause qui fait mouvoir l'aimant. On a donc

là un procédé commode de transformer de l'énergie *mécanique* en énergie *électrique*. C'est ce procédé qui est mis à profit dans les machines *dynamo* et *magnéto-électriques*.

Tout aimant est caractérisé par un *champ magnétique* constitué par des *lignes de force* allant d'un pôle à l'autre et que met en évidence l'expérience des fantômes magnétiques. Ces lignes de force sont surtout condensées, dans le cas d'un aimant en fer à cheval, entre les branches du fer à cheval. Si on fait déplacer à travers ces lignes de force un conducteur électrique qui les coupe, on *induit* dans ce conducteur une force électromotrice proportionnelle *au nombre de lignes de force coupées à chaque instant*. Aussi, dans les dynamos, fait-on déplacer *très vite* dans des champs *très intenses* une *grande longueur* de conducteur rassemblée sous forme d'enroulement.

On exprime encore le résultat précédent en disant que la f. é. m. induite dans un circuit qui se déplace dans un champ magnétique est à chaque instant proportionnelle à la *variation* du flux embrassé et que son sens, donné par la règle empirique des trois doigts, dépend aussi du sens de cette variation.

CHAPITRE TREIZIÈME

APPLICATIONS DES ÉLECTRO-AIMANTS

SONNERIES ÉLECTRIQUES

La précieuse propriété découverte par Ampère de l'aimantation du fer dans une bobine parcourue par un courant, aimantation essentiellement *temporaire* et cessant instantanément[1] avec le courant qui la produit, a été la base d'une foule d'applications.

Nous n'en décrirons ici que quelques-unes, à commencer, sinon par la plus utile, du moins par celle qui a peut-être plus contribué qu'aucune autre à vulgariser l'électricité : la sonnerie électrique.

Disons d'abord que presque jamais l'électro-aimant n'est employé sous la forme qu'il avait au moment de sa découverte par Ampère, et qui est représentée par la figure 89. Sous cette forme, en effet, on ne peut obtenir que l'attraction assez faible de l'*armature* M.

Vous concevez que, pour agir avec plus d'énergie, on ait songé à utiliser les deux pôles au lieu d'un seul, ce qui a conduit à la forme en *fer à cheval* de la figure 90. Dans ces conditions, les effets ne sont pas seulement *doublés* comme vous pourriez le croire, mais bien plus que doublés, parce que les *lignes de force* du champ magnétique produit quand l'électro est *excité* n'ont à traverser que très peu d'air. La *résistance magnétique* (Voir p. 160) est alors bien diminuée et les effets d'attraction sont beaucoup augmentés. Ajoutons en passant que c'est pour diminuer encore cette résistance magnétique, pour se *raccourcir* le plus possible, que les lignes de force du champ, agissant comme le feraient des fils de caoutchouc, rapprochent violemment l'armature.

On utilise généralement à la fois les deux branches de l'électro-

1. Pas rigoureusement, car rien n'est instantané dans la nature.

aimant en fer à cheval pour y enrouler le fil nécessaire à son aimantation. Il faut naturellement faire en sorte que les effets des deux bobines *s'ajoutent*, c'est-à-dire que les flux produits par chacune d'elles circulent dans le même sens à travers le fer. Pour faire l'enroulement en conséquence, on n'a qu'à se baser sur une règle empirique très commode, connue sous le nom de règle du tire-bouchon de Maxwell.

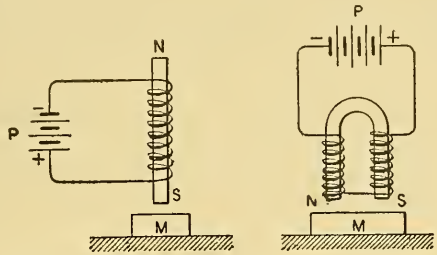


Fig. 89 et 90. — L'électro en fer à cheval attire l'armature M beaucoup plus énergiquement que l'électro droit.

Règle du tire-bouchon de Maxwell.—Lorsqu'un courant circule dans une bobine, il produit un champ magnétique (p. 160) dont les lignes de force sont dirigées (*fig.* 91) dans le sens de l'avancement d'un tire-

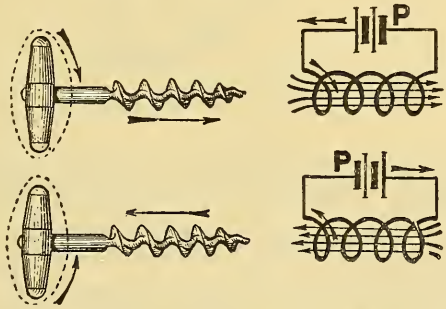


Fig. 91. — Règle du tire-bouchon de Maxwell.

bouchon qu'on tourne dans le sens de la circulation du courant dans la bobine : chacun sait que, si le tire-bouchon tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, il avance, tandis qu'il recule dans le cas contraire.

Réciproquement, si on connaît le sens de ce flux magnétique produit par un courant, il est facile de déduire le sens de ce courant en voyant dans quel sens il faut faire tourner un tire-bouchon pour que son axe se déplace dans le sens des lignes de force. Nous verrons de ce fait une application très utile lorsque nous établirons la théorie de l'anneau Gramme.

Pour le moment, l'application de cette règle nous montrera aisément que les enroulements dans les deux branches d'un électro en fer à cheval doivent être *en sens contraires*, comme il est indiqué dans la figure 90.

Considérons un circuit comprenant un électro E en fer à cheval et une pile P, avec, en outre, un interrupteur disposé comme l'indique schématiquement la figure 92, de manière à fermer le circuit quand on presse sur un bouton I dit *bouton d'appel*. L'électro est placé en regard de son armature mobile M, laquelle est fixée, d'un côté, à un ressort R et terminée, de l'autre, par une petite sphère métallique placée en regard d'un timbre T. Quand nous pressons sur l'interrupteur, l'électro attire son armature et la petite sphère vient frapper le timbre.

Voilà donc une sonnerie constituée. Il faut seulement faire attention qu'au moment de l'attraction, la sphère vienne choquer le timbre

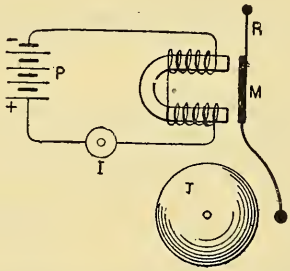


Fig. 92. — Sonnerie sonnant un seul coup.

non pas d'une manière permanente, mais par suite d'une légère élasticité de la tige qui la supporte, car, si, après le choc, le marteau restait collé au timbre, il étoufferait ses vibrations.

Pourtant, ce n'est pas le résultat auquel nous venons de parvenir que nous avons l'habitude de demander à une sonnerie électrique : tout se borne ici à un coup *unique*, l'armature M restant attirée tant que nous pressons sur le bouton.

Mais si nous voulons obtenir cette succession rapide de coups qui est le propre de la sonnerie électrique, il nous suffira d'une modification bien simple.

Au lieu de relier directement les deux pôles de la pile aux deux bornes de l'électro, nous amènerons l'un des deux fils de la pile à l'armature mobile elle-même, en faisant le contact sur l'appendice L, comme l'indique la figure 93. Dans ces conditions, tant que la sonnerie est au repos, le ressort L et la pointe en argent O sont en contact ; aussi, dès que l'interrupteur I est fermé, le courant peut circuler dans l'électro, qui attire son armature mobile : d'où premier coup de timbre. Mais, en même temps, le contact entre L et O s'est rompu.

Le courant cesse donc et l'armature, désaimantée, revient rétablir le contact. D'où, nouveau courant, second coup de timbre et ainsi de suite. On obtient ainsi, en définitive, une succession très rapide de coups de timbre, qui se prolonge autant que la pression sur le bouton d'appel.

Une différence de potentiel de 4 à 5 volts suffit, en général, pour faire fonctionner les sonneries, auxquelles le courant d'alimentation est le plus souvent fourni, pour des raisons que nous avons indiquées précédemment (Voir p. 39), par 3 ou 4 éléments de pile Leclanché.

Combinaisons diverses. — Habituellement, les services que l'on sait faire rendre aux sonneries électriques sont assez restreints. On est satisfait quand, d'un endroit d'une maison ou d'un appar-

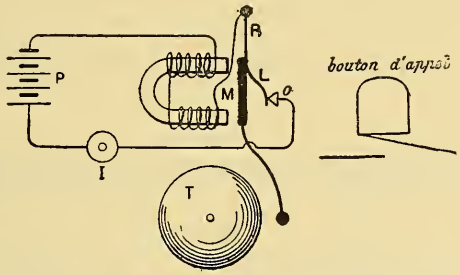


Fig. 93. — Sonnerie donnant un roulement prolongé aussi longtemps que la pression sur le bouton d'appel.

tement, on peut appeler une personne placée à un autre endroit. Il serait cependant facile d'obtenir plus et mieux en n'utilisant cependant que la même sonnerie.

Quelques détails à ce sujet ne seront sans doute pas jugés superflus.

D'abord, on peut actionner une sonnerie d'autant d'endroits différents que l'on veut, en plaçant en ces endroits autant de boutons d'appel. D'habitude, cette installation est faite de la manière suivante :

De la batterie de piles Leclanché, une canalisation générale, établie comme nous l'avons dit (p. 121) en parlant d'éclairage domestique[1], conduit la diff. de pot. à travers tout l'appartement. L'une des bornes de la sonnerie est reliée avec l'un des pôles de la canalisation ; l'autre pôle de celle-ci communique par un fil commun avec des interrupteurs placés dans les différentes pièces, mais tous reliés

1. En fil plus fin, cependant, l'intensité étant ici très faible. Du fil de 1 millimètre, recouvert de coton, suffira amplement.

à l'autre borne de la sonnerie. Quand vous appuyez sur l'un quelconque des interrupteurs, vous déterminez toujours à travers la sonnerie le passage d'un courant qui la met en branle.

Mais il y a un inconvénient à agir de cette façon. Tous les signaux sont identiques, quel que soit le bouton d'appel employé. Il faut arriver à *différencier* ces signaux, de telle sorte que la sonnerie ne fonctionne pas de la même façon si c'est par exemple du salon ou

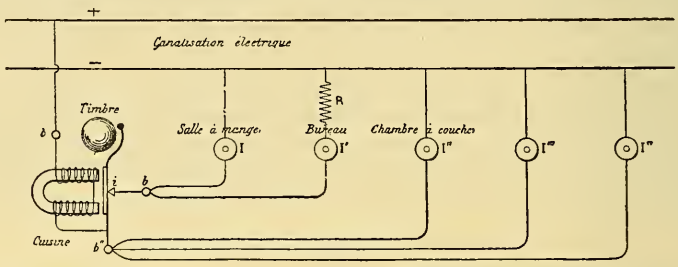


Fig. 94. — Sonnerie électrique unique donnant cinq signaux différents.

du bureau que l'on sonne, et que la personne appelée puisse le savoir immédiatement. Or, ceci n'est pas difficile à réaliser en se conformant au schéma (*fig.* 94) et aux indications suivantes :

Une sonnerie électrique comporte généralement *deux* bornes, disposées sur le socle de l'appareil et communiquant, comme on le voit sur la figure 94, l'une *b* avec une des extrémités du fil de l'électro, l'autre *b'* avec le contact *i* de la tige oscillante. A ces deux bornes, nous commencerons par en ajouter *une troisième b''*, commu-

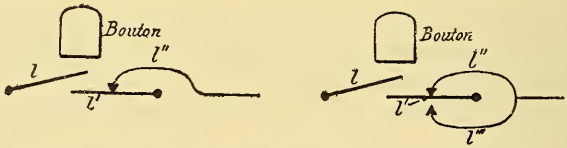


Fig. 95 et 96. — Schéma des interrupteurs I''' et I^iv.

niquant directement avec la seconde extrémité du fil de l'électro sans passer par le contact *i*.

Ceci posé, nous avons disposé dans les différentes pièces de l'appartement des interrupteurs I, I', I'', I''', I^iv, communiquant tous avec le même pôle de la canalisation. Le bouton I, placé, je suppose, dans la salle à manger, communique d'autre part avec la borne normale *b'* de la sonnerie. Sa manœuvre provoque par conséquent un *roulement* ordinaire, prolongé et *énergique*.

Le second interrupteur I', placé, par exemple, dans le bureau, est relié à la même borne *b'*, mais, quelque part sur le trajet, une résistance suffisante R, constituée par un boudin de fil fin enroulé en spi-

rale, est intercalée. Nous obtenons, dans ce cas encore, un *roulement continu*, mais *plus faible*, car la résistance intercalée diminue l'intensité du courant et l'énergie des actions.

Le troisième interrupteur I″, lui, est relié avec la borne supplémentaire *b*″, et sa manœuvre produit, comme on peut s'en rendre compte, une attraction ininterrompue, de sorte que la sonnerie, ici, ne sonne qu'*un seul coup*.

Le quatrième et le cinquième interrupteurs, enfin, également reliés à la borne supplémentaire, présentent une constitution spéciale, que montrent les figures 95 et 96. Il est facile de se rendre compte qu'en appuyant sur le quatrième interrupteur (*fig.* 95), on émet deux courants successifs, le premier en appuyant sur le bouton, le second en l'abandonnant, et qu'en appuyant sur le cinquième interrupteur (*fig.* 96) on émet d'abord deux courants successifs très rapprochés, et un troisième lorsqu'on abandonne le bouton. La sonnerie sonnera donc *deux coups* pour I‴ et *trois coups* pour I^{IV}.

En se creusant la tête, on arriverait à augmenter encore cette variété dans les signaux.

Que mes lecteurs se la creusent s'ils le jugent à propos...

PRINCIPE DU TÉLÉGRAPHE ÉLECTRIQUE

Télégraphe Morse. — L'idée du *télégraphe* électrique remonte à la découverte d'Œrsted. Quelqu'un le proposa à cette époque, qui fut traité de fou. Et allez donc !... Combien d'inventeurs connaissent le compliment !

C'était pourtant, celui-là, un fou très raisonnable; l'action sur l'aiguille aimantée, combinée avec la vitesse énorme de propagation de l'électricité, vitesse déjà constatée, donnait dès ce moment tous les éléments nécessaires pour résoudre la question.

Imaginez que par vingt-cinq circuits conducteurs, on ait relié entre eux les deux points à réunir télégraphiquement, chacun de ces circuits correspondant avec une aiguille aimantée.

Imaginez encore que chacun de ces vingt-cinq systèmes ait été assimilé conventionnellement à l'une des lettres de l'alphabet. Suivant que l'expéditeur aurait fait passer le courant dans tel ou tel fil, l'aiguille correspondante aurait été déviée, et on aurait pu ainsi transmettre tel mot, telle série de mots que l'on aurait voulu. Sans doute ce n'eût été ni très économique comme système, ni très expéditif comme transmission ! mais enfin, quand on y songe, la transmission à distance de la pensée est chose si merveilleuse que, si rudimentaire que fût son système, l'inventeur aurait dû rencontrer mieux qu'une simple menace de visite à Charenton.

Le télégraphe électrique est donc plus moderne. A part quelques

recherches d'Henry, restées sans sanction pratique, ce n'est même qu'en 1840 que l'Américain Morse songea à utiliser au profit de la transmission de la pensée les ressources infinies de l'instrument dont Ampère avait enrichi la science, quinze ans auparavant. Il est vrai que par compensation, Morse dotait la société, du coup, d'un instrument parfait, qui s'est conservé tel jusqu'à nos jours dans la plupart des postes télégraphiques du globe.

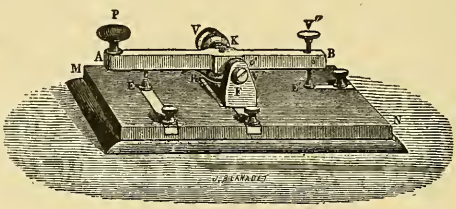


Fig. 97. — Clef de Morse.

Tout le monde connaît le télégraphe Morse pour l'avoir vu aussi bien qu'*entendu* fonctionner, et il suffira d'en indiquer le principe en quelques mots.

Le *transmetteur* se compose tout simplement d'un interrupteur ou *clef de Morse* (*fig.* 97) que l'opérateur manipule en un *tic-tac* tout à

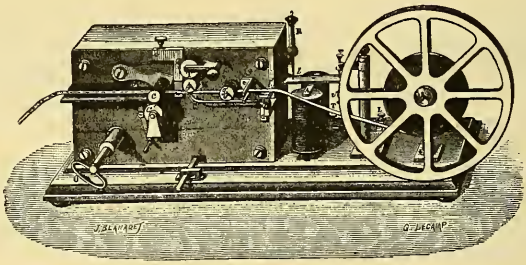


Fig. 98. — Récepteur Morse.

fait caractéristique, de manière à envoyer dans le circuit des émissions de courant soit brèves, soit un peu plus prolongées. Ces émissions cheminent le long de la ligne, parviennent au récepteur à peu près instantanément, quelle que soit sa distance — même *avant* l'heure de départ si la station réceptrice est vers l'ouest — et y actionnent un électro-aimant *imprimeur* dont l'armature trace à chaque attraction un trait sur une étroite bande de papier qu'un mouvement d'horlogerie déroule uniformément. Suivant que l'émission est longue ou brève, le stylet marque sur la bande un *trait* ou un *point;* c'est la succession de ces traits ou de ces points qui, à l'aide de quelques conventions très simples, permet de reconstituer les mots que le poste expéditeur a transmis.

L'un des faits qui ont eu le plus d'influence sur le développement de la télégraphie, en permettant d'en diminuer le coût d'établissement, a été la suppression du second fil des lignes télégraphiques et l'emploi de la *terre* comme circuit de retour. Il est vrai qu'un seul fil, c'est encore beaucoup pour les électriciens d'aujourd'hui... qui n'en veulent plus du tout (Voir p. 387) !

D'ailleurs, on a souvent recours actuellement à des appareils beaucoup plus perfectionnés que le Morse : Baudot, Hughes, etc., qui *impriment* en toutes lettres les messages transmis et accomplissent une besogne que dix appareils Morse ne pourraient abattre.

PRINCIPE DU TÉLÉPHONE

La plus merveilleuse application de l'électro-aimant est peut-être réalisée par le *téléphone*, ce fantastique instrument qui supprime les

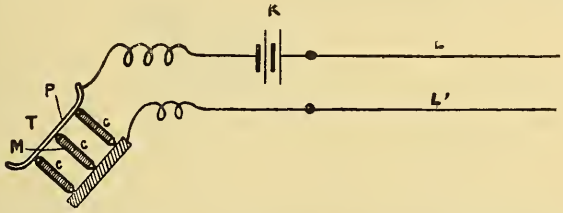


Fig. 99. — Principe du transmetteur microphonique.

distances en permettant non plus seulement à la pensée, mais à la parole avec toutes ses délicatesses et toutes ses nuances, de franchir l'espace avec la vitesse de la lumière.

Et avec quelle simplicité sans pareille est atteint ce résultat prodigieux !

Examinons ce poste transmetteur (*fig.* 99) : un *microphone* M en est la pièce de résistance, constituée en général par un assemblage de pastilles ou crayons C à base de charbon, qui, maintenues sous la plaque vibrante P de l'appareil, sont soumises, pendant qu'on parle devant celle-ci, à des pressions variables suivant avec une fidélité scrupuleuse les vibrations complexes de la parole. Or, ces pastilles, qui jouissent de la propriété de présenter une résistance électrique variable avec la pression à laquelle elles sont soumises, font partie d'un circuit comportant une pile K, la ligne L, et, à quelques centaines de mètres *ou* de kilomètres — la chose est de peu d'importance — le récepteur R que nous allons à son tour disséquer tout à l'heure.

Résultat : sous l'influence des vibrations sonores transmises par la plaque de l'appareil, le microphone transmetteur varie continuellement de résistance et ne laisse passer sur la ligne qu'un courant

variable dont les variations sont scrupuleusement liées aux moindres ondulations sonores sorties de la bouche du causeur : quel sujet d'admiration, cette infinie souplesse de la plaque vibrante s'astreignant à suivre, sans en escamoter une seule, les vibrations sonores qui se succèdent, d'après les physiciens, au taux de plusieurs milliers *par seconde!*

Notre courant variable, porté, non sur l'aile des vents, ce qui eût semblé autrefois le comble de la vitesse, mais sur quelque chose d'incomparablement plus rapide, arrive au récepteur.

Celui-ci, s'il est possible, est encore plus simple que le transmetteur. C'est tout bonnement un électro-aimant à noyau aimanté, dont l'armature est constituée par la plaque vibrante réceptrice elle-même (*fig.* 100).

Notre courant variable pénètre dans l'électro, y provoque, par ses variations, des variations d'attraction toujours intimement liées, en dépit de la distance, en dépit des intermédiaires franchis, aux

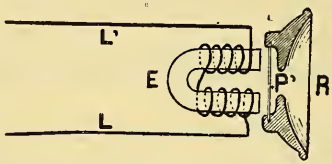


Fig. 100. — Principe du récepteur.

moindres mouvements des lèvres du parleur ; sous cette influence, la plaque du récepteur se met donc à reproduire tous les mouvements de celle du transmetteur : ses vibrations ébranlent l'air et reproduisent *la voix!*

Bien entendu, les choses ne se passent pas dans la pratique avec cette aimable simplicité.

D'abord, pour les longues distances, la résistance de la ligne devenant très forte devant celle du transmetteur, les variations de celle-ci deviennent négligeables; on est alors forcé d'amplifier les variations en passant par l'intermédiaire d'une sorte de petit *transformateur*. N'insistons pas, les phénomènes d'induction, dont la connaissance serait indispensable pour expliquer le rôle de ce transformateur, étant encore mystérieux pour nous.

En revanche, ce que nous pouvons comprendre dès à présent, c'est qu'un *poste* complet doit nécessairement comporter à la fois un transmetteur et un récepteur : ces deux appareils sont alors placés tous deux en dérivation sur la ligne, de telle sorte que le causeur commence par se téléphoner à lui-même, ce qui est peut-être une superfétation, mais non un inconvénient, attendu que, chose curieuse, vous pouvez en faire l'essai, un monsieur qui crie même à tue-tête n'entend pas son téléphone le lui répéter, à moins que celui-ci ne soit bien mal réglé.

Ce que nous comprenons encore, c'est que transmetteur et récepteur ne seraient pas capables, même à eux deux, de permettre une application pratique de la téléphonie, car deux correspondants qui ont à s'en servir ne peuvent avoir le récepteur attaché à l'oreille 24 heures par jour pour ne pas rater ce qu'ils ont à se dire. Téléphones *hauts parleurs* (d'Argy, etc.) mis à part, chaque poste téléphonique doit donc se compléter par un appareil d'avertissement qui est en général une simple sonnerie : le seul fait de la suspension du récepteur à un crochet *ad hoc*, lorsqu'on ne s'en sert pas, intercale cette sonnerie sur la ligne à la place du récepteur, et elle prévient bruyamment l'abonné quand un moment de conversation lui est réclamé.

On conçoit dès lors l'inconvénient qu'il y a à ne pas raccrocher son récepteur à la fin d'une conversation.

Bureaux centraux. — Enfin, si le téléphone devait se borner à permettre la communication entre les deux mêmes personnes, comme nous l'avons admis jusqu'ici, sans doute n'en resterait-il pas moins un merveilleux outil, mais son rôle social s'en trouverait singulièrement atténué.

Il a fallu s'ingénier à rendre possibles les communications entre tous les abonnés d'une ville, d'un pays ; c'est ici qu'apparaît le *bureau central*, où se fait cette cuisine par l'intermédiaire de la demoiselle du téléphone, bête noire des abonnés — pas toujours par sa faute, la pauvre, car elle a plus de besogne que le commun des mortels ne se l'imagine, et les abonnés eux-mêmes sont plus souvent qu'à leur tour terriblement grincheux !

Et si ceux-ci tiennent à faire passer sur quelqu'un leurs accès de bile, si justifiés parfois, il faut bien dire que c'est sur l'Administration elle-même qu'ils peuvent et doivent tomber.

L'Administration sait fort bien qu'un peu moins d'entêtement de sa part aidant, les appareils Hess et Raverot, basés sur une ingénieuse application des combinaisons deux à deux, pourraient donner des résultats autrement parfaits que ses tableaux multiples actuels, dont la complication, accrue comme le *carré* du nombre des abonnés, en devait fatalement venir à être inextricable.

Elle sait aussi qu'à Chicago, New-York et autres lieux, un système de téléphone *automatique* a été institué, dans lequel tout intermédiaire serait supprimé, les abonnés eux-mêmes se donnant les communications dont ils ont besoin.

Qu'est-ce que tout cela peut bien lui faire !

LE TÉLÉGRAPHONE

Mais je suppose que le correspondant appelé ne répond pas à son téléphone ?

Actuellement, c'est tant pis pour lui — ou pour l'autre, suivant les cas, à moins que ce ne soit tant pis pour les deux.

Demain [1] il en ira autrement, grâce à une étonnante invention de l'ingénieur danois Poulsen (*fig.* 101) :

A l'aide d'un courant spécial lancé à propos, l'appelant, constatant que l'appelé n'est pas là, mettra en branle chez ce dernier un ensemble de 2 cylindres parallèles O, O', entre lesquels se déroulera un mince fil d'acier F d'un demi-millimètre de diamètre. Ce fil, passant entre les deux branches d'un électro-aimant récepteur spécial E, subira les variations d'aimantation provoquées par la parole de l'appelant, lesquelles s'inscriront d'une manière indélébile dans le fil d'acier sous forme d'un magnétisme rémanent variable en chaque point.

L'appelé, en rentrant, constatant que ses cylindres récepteurs ont tourné, s'empressera de prendre connaissance du message *inscrit dans le fil.*

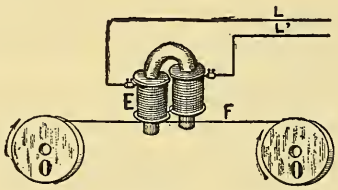


Fig. 101. — Principe du télégraphone.

Il lui suffira pour cela de faire repasser celui-ci — dans le même sens, car, sans cela, quelle cacophonie! — entre les branches de l'électro *ad hoc* E, préalablement relié au récepteur téléphonique.

Le phénomène inverse de celui de l'inscription se produira alors, c'est-à-dire que, sous l'influence des variations d'aimantation du fil, des forces électromotrices d'induction prendront naissance dans l'enroulement de l'électro et provoqueront à travers le récepteur un courant variable exactement semblable à celui qu'y aurait provoqué directement la parole du correspondant : D'où une reproduction merveilleusement fidèle de la voix par ce *télégraphone*, dernier *cri* — c'est bien le cas de le dire — du phonographe, exempt de cet accent nasillard que valaient à l'invention d'Edison le frottement des organes complexes de l'instrument, la déformation des ondes résultant de l'effort mécanique nécessaire pour enfoncer le stylet dans la cire, etc. Ici, plus de ces frottements, plus de ces efforts préjudiciables : le fil enregistreur passe libre, sans aucun contact, entre les deux branches de l'électro et attrape pour ainsi dire au vol toutes les impressions qu'il aura plus tard à nous restituer.

---

1. Après-demain peut-être, car M. Poulsen n'a pas l'air pressé. (Note de la cinquième édition.)

LES LAMPES A ARC

Arc ordinaire. — Arc à flamme de Bremer. — L'électro-aimant constitue encore l'âme de ces lampes à arc qui inondent de leur admirable lumière nos villes et nos usines.

On en connaît le principe, découvert par Davy :

Deux crayons de charbon spécial, très conducteurs, analogues à ceux employés dans les piles, soumis à une différence de potentiel d'une cinquantaine de volts, sont amenés au contact, puis écartés à quelques millimètres l'un de l'autre ; l'espace qui les sépare s'illumine d'une flamme qui n'est autre chose que l'étincelle électrique, et que Davy a baptisée du nom d'*arc électrique*, parce que, si on augmente la différence de potentiel agissante et si, en même temps, on

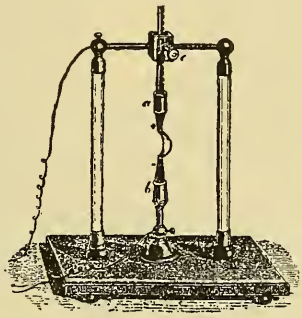


Fig. 102. — L'arc électrique : expérience de Davy.

écarte davantage les charbons, on voit la flamme se courber en un véritable arc réunissant les pointes des deux charbons (*fig.* 102).

Cette flamme est très faiblement lumineuse, sauf dans les lampes dont nous allons parler, et ce n'est pas du tout à l'*arc* que les lampes à *arc* doivent leur éclat sans rival.

Plus des 9 dixièmes de la lumière proviennent de l'extrémité du charbon positif, qui se creuse en un éblouissant *cratère* (*fig.* 103), tandis que le charbon négatif, peu lumineux, se taille en pointe pendant le fonctionnement. Et comme, généralement, on se propose d'éclairer au-dessous de la lampe, cette disposition des charbons oblige naturellement à mettre *en haut* le charbon positif.

Quelle est la cause de cette transformation si intéressante de l'énergie électrique en énergie lumineuse ? C'est que presque toute la résistance du circuit est localisée à la sortie du courant du charbon positif, bon conducteur, dans l'air, mauvais conducteur, qui sépare les deux charbons. Toute l'énergie électrique fournie au

circuit vient donc se dépenser là, dans un espace très petit : d'où un développement énorme de chaleur qui a pour effet d'amener le charbon positif à la température la plus haute qu'il puisse supporter, celle de son *ébullition*, température qu'on ne peut effectivement pas plus dépasser avec le charbon qu'on ne saurait, quelle que soit l'intensité du foyer, dépasser la température de 100° dans l'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique.

La température de l'arc est donc immuable, soit 3.500° environ, d'après les savantes recherches de M. Violle, et l'*éclat* de toutes les lampes à arc est *le même*.

Fig. 103. — Aspect des charbons.

Lorsqu'on augmente le courant qui les alimente, on n'augmente donc pas du tout l'éclat du cratère, mais simplement la *surface* incandescente.

Pour pouvoir augmenter encore la température, et avec elle le rendement lumineux, il faudrait trouver un autre corps conducteur de l'électricité, possédant un point d'ébullition supérieur à celui du carbone et, comme ce dernier, comme l'arsenic et quelques rares autres corps, jouissant de la curieuse propriété de *bouillir à l'état solide*.

Ou alors, il faudrait procéder autrement et entrer dans une voie qui paraît avoir été ouverte avec succès par les recherches de l'Américain Bremer : cet inventeur mélange, en proportion considérable, aux matières destinées à la préparation de ses charbons, des subs-

tances de la famille de celles qui sont employées dans le bec Auer, chaux, magnésie, etc., et qui sont douées, pour des raisons encore peu connues, de la singulière propriété de transformer en lumière énormément de l'énergie qu'on leur applique. Ces matières se trouvant, lors du fonctionnement de la lampe, soumises directement à l'énorme température développée par l'ébullition du carbone qui les entoure, l'éclat et le rendement lumineux deviennent merveilleux : la bougie serait produite avec 0,2 *watt* à peine, alors qu'il en faut 0,4 à 0,5 dans les lampes à arc ordinaires, 3 à 3,5 dans les lampes à incandescence, et l'équivalent de *quatre-vingts* à *quatre-vingt-dix* dans la bougie de cire !

Des résultats encore plus remarquables ont été obtenus récemment avec les charbons *trizones* de M. A. Blondel, qui permettent, affirme-t-on, d'employer les lampes à arc ordinaires en en *quadruplant* le rendement.

L'arc électrique constitue donc une source de lumière à nulle autre pareille.

Mais, lorsqu'on a voulu l'utiliser comme telle, on s'est heurté à une très grosse difficulté ; par suite tant de la combustion des charbons dans l'air que d'un actif transport des molécules de carbone du positif vers le négatif, les charbons *s'usent*, surtout le positif, malgré la précaution qu'on a de le prendre plus gros ; l'écart augmente rapidement, ainsi que la résistance du circuit, de sorte que le courant diminue rapidement, et avec lui le pouvoir lumineux, jusqu'à ce qu'extinction s'ensuive.

On n'obtiendra donc un pouvoir éclairant constant qu'à la seule condition de maintenir l'écart constant. Dans les premiers temps qui suivirent la découverte de Davy, on était peu difficile, n'ayant pas le choix des moyens ; on se contentait de fixer le charbon positif (*fig.* 102) à une crémaillère qu'un préposé spécial réglait de temps en temps. Peu industriel, ce procédé a dû céder la place à d'autres, et le célèbre physicien Foucault a combiné le premier *régulateur* électrique ; maintenant, on ne compte plus ces sortes d'appareils, l'inventeur de lampes à arc s'étant à peu près aussi répandu dans ces dernières années que le chercheur de mouvement perpétuel, ce qui n'est pas peu dire. Hâtons-nous de l'ajouter, il ne résulte pas de là qu'il y ait aujourd'hui *beaucoup* de bonnes lampes à arc : cela, c'est une tout autre histoire...

Essayons de nous rendre compte de quelques-uns des principes qui sont mis à profit dans ces appareils.

Régulateurs en série ; lampe Cance. — Dans une première classe de régulateurs, dit régulateurs *en série*, on met à profit le fait que quand l'écart augmente, l'intensité du courant diminue. Dans ce cas, on intercale en série avec l'arc (*fig.* 104) un électro-aimant à

gros fil E dont le noyau N, par suite de la diminution d'attraction, effectue des mouvements qui ont pour effet de ramener l'écart et le courant à leur valeur normale.

Ainsi, c'est le courant lui-même qu'on charge d'entretenir sa propre santé, et cela paraît une excellente idée : quel médecin peut avoir de nous plus de souci que nous-mêmes !

Par exemple, la figure schématique 104 indique un moyen, d'ailleurs très mauvais, d'obtenir ce résultat, puisque, quand l'intensité diminue, l'effet des ressorts antagonistes tend à diminuer l'écart. L'*allumage*

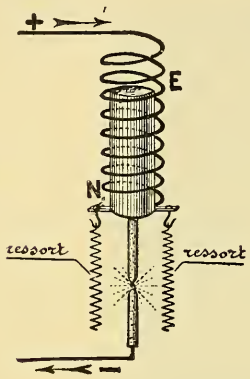


Fig. 104. — Schéma d'un mauvais régulateur en série.

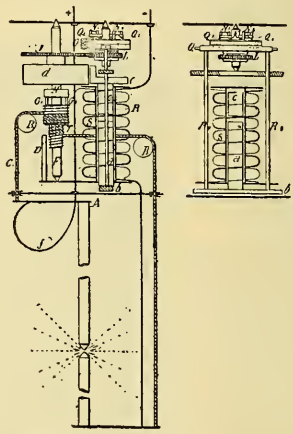


Fig. 105. — Régulateur Cance.

se fait ici très simplement, car, les charbons étant en contact au moment où l'on lance le courant, l'attraction très énergique qui se produit détermine la séparation brusque des charbons, entre lesquels l'arc jaillit aussitôt.

Pourquoi donc le système est-il si mauvais ?

Parce que, au fur et à mesure que les charbons s'usent, le noyau N sort de plus en plus de l'électro et finit par échapper à son action, auquel cas les charbons finissent par tomber en contact au bout d'un temps assez court.

On conçoit donc que, en général, il convient de s'arranger pour que l'armature reste ou revienne toujours sensiblement à la même place en dépit de l'usure des charbons[1].

1. On peut cependant citer comme exception à cette règle les lampes du type Pilsen, dans lesquelles les électros, solidaires des charbons, peuvent effectuer, grâce à leur forme conique allongée, de très grands déplacements ; et les lampes Gaiffe, comportant des électros dont un mode spécial d'enroulement rendait l'attraction sensiblement constante.

Par exemple, dans la lampe Cance, l'une des plus connues (*fig.* 105), la diminution d'attraction a seulement pour effet de desserrer un frein qui permet au porte-charbon supérieur de descendre par son poids jusqu'au point où, l'intensité étant redevenue normale, le frein se resserre. Ces mouvements se font par fractions insensibles, comme il convient pour assurer la fixité de l'éclairage. Mais, dans ce cas et les analogues, un dispositif spécial est nécessaire pour assurer *l'allumage* initial ; ce mécanisme se réduit en général à un électro-aimant traversé par le courant, et qui attire un noyau ou une armature fixée à un des charbons, de manière à provoquer la séparation de ceux-ci.

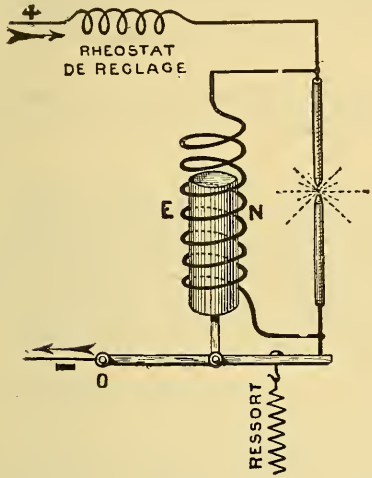


Fig. 106. — Schéma d'un mauvais régulateur en dérivation.

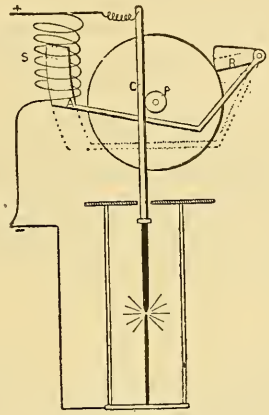


Fig. 107. — Schéma d'un régulateur Brianne.

Régulateurs en dérivation ; lampe Brianne. — Dans une autre classe de régulateurs — régulateurs en *dérivation* — au lieu de profiter des variations du courant, on s'adresse à la différence de potentiel aux bornes de l'arc, qu'on s'arrange de manière à faire varier avec l'écart par l'addition, en série avec l'arc, d'une résistance ou *rhéostat de réglage*.

La présence de cette résistance gaspilleuse d'énergie est un mal nécessaire ; elle est, en effet, indispensable pour que la diff. de pot. aux bornes de l'arc présente la variabilité désirée, car si cet arc était directement branché sur la différence de potentiel constante de la canalisation d'éclairage, soit E, les volts aux bornes resteraient forcément toujours égaux à E, quel que soit l'écart, et il n'y aurait pas moyen de corriger celui-ci.

Au contraire, avec la résistance R en série, on absorbe une partie

RI de la diff. de pot. *E*, partie d'autant plus petite que le courant qui alimente l'arc est moindre — c'est-à-dire que les charbons sont plus éloignés — de telle sorte que la diff. de pot. qui subsiste aux bornes de l'arc, soit donc *E* — *RI*, *augmente* avec l'écart et réciproquement.

Si alors, en dérivation sur ces bornes de l'arc, nous branchons la bobine de fil fin d'un électro *E*, nous pourrons utiliser les augmentations d'attraction corrélatives des augmentations d'écart pour provoquer, par l'intermédiaire de l'armature, certains mouvements tendant à ramener l'écart à la même valeur.

Le schéma figure 106 indique pour y arriver un moyen très simple, mais qui serait détestable en pratique pour des raisons analogues à celles qui ont été développées au sujet du montage de la figure 104. Ici encore, il est le plus souvent nécessaire que le noyau revienne toujours à la même position.

C'est ainsi que, dans la lampe Brianne, l'augmentation de l'écart se traduit d'abord par l'enfoncement de plus en plus grand du noyau A de l'électro (fig. 107).

Mais ce noyau est solidaire d'un secteur denté *R* qui, lorsque l'attraction est suffisante, désengrène le volant *P* : Sous l'action de la pesanteur, le charbon supérieur se rapproche alors de l'autre, ce qui fait diminuer la diff. de pot. aux bornes, et retomber le noyau : le secteur denté réengrène le volant et l'écart se maintient à sa nouvelle valeur jusqu'à ce que le précédent ordre de faits se renouvelle.

Quant à l'allumage initial, il se fait ici sans aucun mécanisme spécial :

Au repos, le noyau, n'étant pas attiré, est au bas de sa course, et un léger écart sépare les charbons. Vient-on à fermer l'interrupteur qui commande la lampe, la totalité de la diff. de pot. agissante se trouve portée sur l'électro, qui attire énergiquement le noyau. Le secteur denté désengrène donc les charbons : ceux-ci viennent au contact, d'où un court-circuit qui fait tomber à zéro la diff. de pot. aux bornes. Le noyau retombe et sépare les charbons : l'arc jaillit.

CHAPITRE QUATORZIÈME

PRINCIPE DES MACHINES A COURANT CONTINU

ANNEAU GRAMME

Déplacement d'une spire conductrice dans un champ magnétique. — Revenons au déplacement des conducteurs dans les champs magnétiques et proposons-nous, à leur aide, de produire une f. é. m. *constante*, identique à celle des piles.

Ce n'est pas une petite affaire : il a fallu arriver jusqu'à 1870 pour y réussir.

D'après ce qui a été dit précédemment (p. 162), vous concevez que nous pourrions obtenir une f. é. m. constante en déplaçant régulièrement notre conducteur en ligne droite à travers les lignes de force parallèles et également espacées d'un champ magnétique *uniforme* et indéfini.

Malheureusement, si cela ne nous coûte pas cher d'imaginer un champ indéfini, il est évidemment impossible d'en réaliser un pratiquement. Il y a bien le champ terrestre, mais il est beaucoup trop faible. Et, comme nous ne pouvons disposer en pratique que d'un champ restreint, il faut bien que notre conducteur, à un moment donné, revienne sur ses pas et rentre dans le champ si nous voulons qu'il continue à couper des lignes de force. Mais alors sa f. é. m. s'inverse (p. 164).

Conséquence, on ne peut obtenir directement à l'aide du déplacement des conducteurs *que des courants alternatifs*, et il faut avoir recours à des *trucs*, à des artifices spéciaux pour obtenir du courant continu.

Beaucoup d'attention ne sera pas de trop pour comprendre comment on y arrive.

Imaginons un champ magnétique *uniforme* produit par un système magnétique PP′ (*fig.* 108).

Faisons-y tourner dans le sens des aiguilles d'une montre, autour d'un axe XX′ normal aux lignes de force, à une vitesse uniforme, une spire de fil MN dont le plan passe par l'axe XX′.

Par convention, nous figurerons par un gros trait la moitié de spire qui est de notre côté.

Cette spire, dans sa rotation, va être le siège d'une f. é. m. induite (Voir 166).

Il y a dans la production de cette f. é. m. une particularité qu'il importe essentiellement de comprendre : bien que la spire

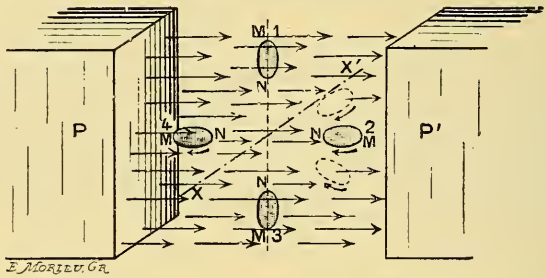


Fig. 108. — Variations de la f. é. m. dans une spire tournant dans un champ uniforme.

tourne à une vitesse uniforme, la variation du flux embarrassé, elle, *n'est pas uniforme du tout :* elle est même beaucoup plus grande à certains moments qu'à d'autres, ainsi, naturellement, que la f. é. m. induite.

Par exemple, quand la spire MN est dans une position voisine de 1, il est bien visible qu'elle se déplace presque *parallèlement* aux lignes de force. Elle n'en coupe presque pas. Le flux embrassé, d'ailleurs très grand, *varie donc peu :* par suite, f. é. m. faible au voisinage de 1.

Il y a plus : C'est en 1 que le flux qui traverse la spire est maximum, puisque MN se présente normalement aux lignes de force et non pas obliquement. Donc, le flux, qui augmentait jusqu'en 1, ne peut que diminuer, passé cette position. Pour qu'après avoir augmenté il se mette à diminuer, il faut bien

qu'il éprouve un temps d'arrêt, au moment même de sa plus grande valeur. Ainsi, le flux cesse un instant de varier en passant en 1, de sorte que la f. é. m. induite est non seulement très faible, mais exactement *nulle* en cet endroit — bien que le flux embrassé y soit maximum.

Mais la spire, se dirigeant de 1 vers 2, se remet à couper des lignes de force et les coupe évidemment *de plus en plus vite* à mesure qu'elle s'approche de 2.

Donc, la f. é. m. produite, nulle en 1, augmente progressivement jusqu'en 2, où cependant le flux embrassé est *nul*, mais où la *variation* de ce flux est au contraire le plus rapide possible : Rappelez-vous, c'est essentiel, que, pour que la f. é. m. soit grande, c'est la *variation* du flux embrassé qui doit être rapide et non le flux lui-même qui doit être très grand.

Arrivé en 2, le flux embrassé, qui *diminuait* jusque-là, se met à *augmenter :* le courant doit donc changer de sens. Et pourtant, non ! Car, en même temps, le circuit lui-même s'inverse, parce que les lignes de force, qui entraient jusque-là dans la spire par sa *face supérieure* (Voyez fig. pointillée au-dessus de 2), entrent maintenant par sa face *inférieure* (voyez fig. pointillée au-dessous de 2), ce qui, pour notre spire, est la même chose que si les lignes de force du champ *avaient changé de sens*. Ces deux effets inverses se compensent évidemment, et le courant continue à circuler dans le même sens à travers la spire.

A partir de cette position 2, l'inclinaison de la spire va varier de moins en moins vite jusqu'en 3, où, comme en 1, elle se déplacera parallèlement aux lignes de force et ne les coupera plus du tout pendant un court instant. Donc, en résumé, la f. é. m., qui de nulle en 1 était devenue progressivement maxima en 2, diminue progressivement à partir de 2 pour redevenir nulle en 3.

En 3, les choses changent.

Le flux embrassé, qui avait augmenté de 2 à 3, se met à *diminuer*. Il y a donc *inversion* de f. é. m. ; mais, cette fois, la spire, elle, ne s'inverse pas et continue à se présenter par la même face aux lignes de force de champ. Ici, l'inversion de la f. é m. est donc effective et le courant circule maintenant

en sens inverse, allant maintenant *de N vers M* à travers le gros trait de la spire, au lieu d'aller *de M vers N*.

Pour les mêmes raisons que tout à l'heure, cette f. é. m. ira en augmentant jusqu'en 4, où elle sera maxima, dépassera cette position *sans s'inverser*, de même qu'en 2, puis décroîtra et redeviendra nulle en 1, où elle s'inversera de nouveau pour continuer indéfiniment le même cycle de variations.

Pour nous résumer :

1° Pendant toute la moitié de sa course située à droite de la ligne 1-3, la spire est le siège d'une f. é. m., *toujours de même sens*, qui, nulle en 1, devient maxima en 2 pour s'annuler en 3, où elle s'inverse ;

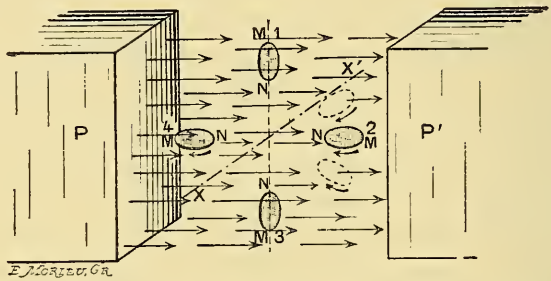


Fig. 109. — Variations de la f. é. m. dans une spire tournant dans un champ uniforme.

2° Pendant toute la moitié de gauche de sa course, la spire est le siège d'une f. é. m. *toujours de même sens, inverse de la précédente*, et qui, nulle en 3, devient maxima en 4 pour s'annuler de nouveau en 1, où elle s'inverse.

Si vous avez bien saisi ce qui précède, la compréhension de l'anneau Gramme et des machines dynamos ne présentera pour vous aucune difficulté.

Déplacement d'un anneau de spires conductrices. — Admettons que toute la circonférence parcourue tout à l'heure par notre spire unique est garnie de spires semblables reliées les unes aux autres (*fig.* 110). D'après ce qui précède, si, à un instant quelconque, nous séparons ces spires par la pensée en deux moitiés par la ligne AB, toutes les spires à gauche de cette ligne sont le siège de f. é. m. de *même sens*

et, comme elles sont naturellement couplées en série, toutes ces f. é. m. *s'ajoutent :* ainsi, il existe entre les deux extrémités de cette moitié de l'*anneau* une f. é. m. égale à la somme de toutes les f. é. m. partielles et dont le pôle positif est par exemple[1] en A.

De la même façon, les spires de la moitié de droite de l'anneau sont toutes le siège de f. é. m. de même sens entre elles, mais opposées à celles de la moitié de gauche. Ces spires ajoutent donc elles aussi leurs f. é. m. partielles pour fournir entre les deux points A et B une f. é. m. totale égale à leur somme et *opposée* à la f. é. m. totale de l'autre moitié, c'est-à-dire que son pôle positif se trouve en regard de celui de l'autre, en A. Comme les choses sont identiques de part et

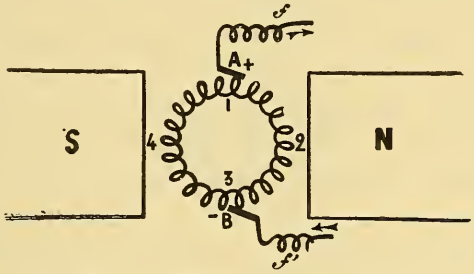


Fig. 110. — Principe de l'anneau Gramme.

d'autre de l'axe, ces deux f. é. m. totales sont non seulement opposées, mais *égales* entre elles.

---

1. On détermine aisément le sens du courant induit dans une spire et, par suite, celui de la f. é. m., grâce à l'observation suivante :

Comme tout courant traversant un circuit, le courant induit produit pendant toute sa durée un champ (p. 161 et 169) qui se combine au champ inducteur. Or, la règle du tire-bouchon de Maxwell (p. 169) permettrait de trouver le sens du courant induit si on connaissait celui de son champ : pour déterminer ce dernier, il suffira de savoir que le flux magnétique produit par le courant induit tend à *s'opposer à la variation* du flux inducteur qui lui donne naissance. Cette loi, connue sous le nom de *loi de Lenz*, n'est qu'un cas particulier de cette loi générale de mécanique qui veut que la *réaction* soit de sens contraire à l'action.

Si, par exemple, le flux inducteur augmente, le flux provenant du courant induit tend *à empêcher cette augmentation :* il faut pour cela qu'il soit de *sens contraire* au flux inducteur : le sens de ce flux induit ainsi déterminé, la règle de Maxwell (p. 169) permet de trouver facilement le sens du courant induit lui-même.

Si, au contraire, le flux embrassé par la spire diminue, le flux induit tend à *empêcher cette diminution :* il faut pour cela qu'il soit de *même sens* que le flux inducteur : et, appelant Maxwell à notre secours, nous conclurons encore de là le sens du courant induit.

En outre, remarque capitale, la f. é. m. totale développée dans la moitié de droite *ou* la moitié de gauche de l'anneau reste CONSTANTE malgré la rotation, car, bien que la f. é. m. de *chacune* des spires de droite, par exemple, soit variable, la diminution dans les spires allant de 2 vers 3 est toujours compensée par l'augmentation dans celles allant de 1 vers 2, de sorte que la somme, elle, reste constante.

Nous pouvons donc considérer notre anneau comme constituant deux sources de f. é. m. *constantes* et égales entre elles, reliées en A et B par leurs pôles de même nom. Si l'anneau ne travaille sur aucune résistance extérieure, ces deux f. é. m. se font équilibre, car elles sont opposées l'une par rapport à l'autre : l'anneau n'est alors le siège d'aucun courant et ce n'est que justice, puisque nous ne lui faisons fournir aucun travail extérieur ; sa rotation ne coûte que la dépense d'énergie nécessaire pour vaincre les frottements sur les paliers.

Mais si nous relions les deux pôles communs A et B par un circuit extérieur, les deux sources fonctionneront comme deux piles montées en quantité (voir p. 90) et enverront chacune dans le circuit une moitié du courant total sous une tension représentée par la f. é. m. continue et constante développée dans chaque moitié de l'anneau.

Tel est, théoriquement au moins, l'*anneau Gramme*.

Collection du courant. — Ceci, pourtant, ne vous satisfait pas encore.

D'abord, comment faire pour relier le circuit extérieur à ces deux points A et B d'un anneau qui tourne à quelque mille ou douze cents tours par minute? Ce problème si embarrassant n'est pas bien difficile à résoudre, parce que ces deux points A et B sont *fixes* dans l'espace. Vous pouvez vous imaginer aisément que le fil de l'anneau soit *dénudé* extérieurement, sans que pourtant les spires consécutives soient en contact métallique, ce qui les transformerait en circuits fermés sur eux-mêmes, lesquels seraient traversés en pure perte par des courants énergiques.

Et il suffira alors de placer en A et B des frotteurs métalliques

élastiques — des *balais*, pour les appeler par leur nom — qui enverront au circuit d'utilisation le courant produit.

Passons aux dispositions employées en pratique.

D'abord, il est bien certain que nous ne pourrions faire tourner notre hélice dans l'espace à une pareille vitesse si elle n'était enroulée (*fig.* 111) sur un support rigide en forme d'anneau. Cet anneau est supporté lui-même par l'axe O, qui lui transmet le mouvement de rotation nécessaire.

Avec quelle matière constituerons-nous cet anneau? Vous vous doutez de la réponse.

Si les lignes du champ inducteur avaient à parcourir dans l'air le long trajet compris entre les deux pôles de la figure 110, elles

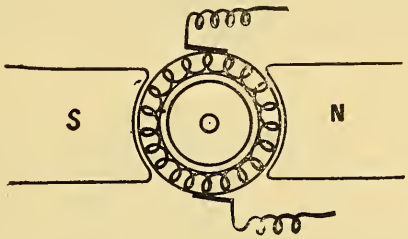


Fig. 111. — Disposition pratique de l'anneau Gramme.

y rencontreraient une résistance magnétique énorme (p. 160), et le champ ne pourrait pas être intense, ce qui est pourtant, nous 'avons vu, indispensable à la production d'une grande f. é. m.

Aussi, on constitue l'anneau *en fer :* les lignes de force, y trouvant un chemin infiniment plus facile, produisent une aimantation extrêmement intense, grâce à la faible résistance magnétique du circuit.

En même temps, on se garde bien d'écarter l'une de l'autre, comme le représentait la figure 110, les deux masses polaires magnétiques N et S. On les rapproche, au contraire, en forme de mâchoires (*fig.* 111), en laissant juste entre les deux *épanouissements polaires* ainsi obtenus la place nécessaire pour y loger l'anneau, de manière à réduire au minimum la résistance magnétique. Tout au plus réserve-t-on, entre les mâchoires et l'anneau, le petit intervalle, ou *entrefer*, strictement nécessaire au jeu de l'anneau, lequel doit être parfaitement centré.

Et c'est à juste titre qu'on s'attache à réduire cet entrefer, car, si petit soit-il, l'air est si peu perméable comparativement au fer que c'est là que se localise presque toute la résistance magnétique (p. 160), si nuisible à l'intensité du champ.

COURANTS DE FOUCAULT

Comment ils prennent naissance. Leur atténuation. — Si nous faisions tourner à toute vitesse dans un champ intense un anneau constitué, de la façon que nous venons de dire, par une masse de fer enroulée de fil conducteur isolé, nous ne tarderions pas à être arrêtés par une forte odeur de roussi.

Pourquoi?

Faisons (*fig.* 112) une expérience bien curieuse et très simple.

Suspendons à un fil de soie *f*, entre les deux pôles d'un électro en fer à cheval non excité, une petite masse métallique, une petite sphère de cuivre S par exemple ; tortillons ce fil entre nos doigts, de manière à communiquer à la sphère un mouvement de rotation rapide. Elle continue à tourner rapidement pendant un certain temps, s'arrêtant un moment pour repartir en sens contraire, et ainsi de suite. Ce n'est pas cela, je me hâte de le dire, que j'ai la prétention de vous faire trouver étonnant.

Mais excitons l'électro.

La sphère, lancée au galop, s'arrête tout d'un coup!

Cette masse métallique coupe des lignes de force en tournant dans le champ que nous venons de créer. Il s'induit donc dans son intérieur une certaine f. é. m. et, comme cette masse constitue, en somme, un circuit fermé de faible résistance, sous l'influence de cette f. é. m., des courants intenses ont pris naissance. Ce sont des *courants de Foucault*, ainsi nommés du physicien français qui les découvrit.

Or, ces courants se transforment en chaleur, donc absorbent de l'énergie. Cette énergie, où la trouver? Dans celle que nous avons emmagasinée dans la masse sous forme de mouvement.

Mais cette source d'énergie est bien faible; elle est bientôt tarie et, presque instantanément, la masse s'arrête.

Comme la petite masse, notre anneau en fer massif se déplace dans un champ intense et est le siège de courants de Foucault. Mais lui ne s'arrête pas, puisque nous dépensons une énergie suffisante pour entretenir son mouvement de rotation. Ces courants de Foucault continuent donc à se produire, à se dépenser en chaleur et à élever progressivement la température de la masse.

D'où, à un moment donné, carbonisation des fils et production de cette odeur caractéristique que votre nez — inquiet à juste titre — vous aurait révélée.

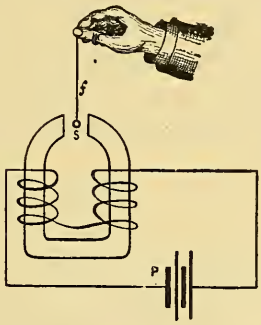


Fig. 112. — Expérience sur les courants de Foucault.

Il faut donc éviter à tout prix ces courants de Foucault, et cela, non seulement parce qu'ils rôtiraient nos fils avec une précision dont les allumettes de la régie pourraient être jalouses, mais encore parce qu'ils absorberaient en pure perte énormément d'énergie.

On arrive à ce résultat en sectionnant l'anneau, en le constituant par des disques de tôle mince séparés par du papier et empilés les uns sur les autres, ou par des fils de fer vernis. Comme cela, chaque tôle ou chaque fil, disposé *dans le sens du champ*, n'est traversé que par un petit nombre de lignes de force et n'est, par conséquent, le siège que d'une f. é. m. très faible.

De plus, en diminuant ainsi les dimensions des masses

métalliques, on augmente la résistance électrique des circuits fermés et, par suite, on affaiblit l'intensité des courants nuisibles produits.

Pour ces deux raisons, avec des tôles d'un demi-millimètre d'épaisseur, la proportion d'énergie qui est absorbée par les courants de Foucault devient très faible et ne diminue pas beaucoup le rendement de la machine. Mais il faut noter qu'ils continuent à se produire tant que le champ existe, et alors même qu'on ne fait pas débiter l'anneau sur un circuit extérieur[1] : les courants de Foucault, c'est, pour les dynamos, l'attaque à circuit ouvert du zinc des piles.

Remarquez — la remarque a sa valeur — que, malgré le sectionnement de l'anneau, les lignes de force n'en continuent pas moins à circuler d'un bout à l'autre de l'anneau dans du fer, puisque les tôles sont orientées dans le sens du champ, en travers de l'anneau ; ainsi, l'atténuation des courants de Foucault est obtenue sans augmenter sensiblement la résistance magnétique.

Observons encore que s'il est indispensable de feuilleter l'induit, il est tout aussi inutile de feuilleter l'*inducteur*, c'est-à-dire le système producteur du champ, car ce champ restant constant, l'inducteur ne s'y déplaçant pas, il n'y a pas dans sa masse de variations de flux, partant pas de courants de Foucault.

Mais, par contre, il serait indispensable de feuilleter une pièce métallique qui, même *fixe*, serait traversée par un champ magnétique rapidement variable.

Nous verrons l'application de cette observation à propos des bobines de Ruhmkorff et des transformateurs.

HYSTÉRÉSIS

Sa cause. Atténuation des pertes qu'il provoque. — Indépendamment des courants de Foucault, l'induit des

1. Sauf cependant dans les dynamos *en série* (voir p. 202), dans lesquelles le champ inducteur est provoqué par le débit même de la machine.

dynamos est encore soumis à une autre cause de pertes pendant sa rotation dans le champ inducteur.

Cette cause, c'est l'*hystérésis*, d'un mot grec qui signifie... mais ne prenons pas de mauvaises habitudes!

D'autant plus que l'étymologie en question est précisément cause que ce phénomène fort simple est, la plupart du temps, très mal compris.

On appelle ainsi un phénomène en vertu duquel le fer soumis à l'action d'un champ magnétique subit une sorte de déformation moléculaire analogue à la déformation d'un ressort dont on a dépassé la limite d'élasticité.

Le *magnétisme rémanent* est une des manifestations de cet hystérésis : le fer qui a été soumis à l'action d'un champ magnétique devrait complètement se désaimanter lorsque ce champ disparaît ; mais, en vertu de son hystérésis, il reste toujours aimanté partiellement, de même qu'une lame de ressort dont on a dépassé la limite d'élasticité ne revient jamais à sa position d'équilibre initiale et reste déformée indéfiniment.

Quelquefois, rarement, l'hystérésis est une bonne chose : ainsi, nous verrons tout à l'heure que Wheatstone et Siemens ont été fort heureux de trouver le magnétisme rémanent pour en faire la base de l'auto-excitation des dynamos. Mais, pour un pauvre service, de combien de mauvais tours ne sont pas redevables à l'hystérésis les électriciens, dont il fausse les instruments de mesure, dont il empêche les dynamos d'être des outils tout à fait merveilleux!

Il est, en effet, aisé de se rendre compte que ce phénomène doit se traduire, dans les dynamos, par des pertes d'énergie importantes.

Tirons alternativement vers la droite, puis vers la gauche, une lame de ressort verticale fixée à l'une de ses extrémités. Agissons d'abord modérément, sans dépasser la limite d'élasticité : l'énergie que nous dépensons s'emmagasine sous forme de tension des molécules et sera restituée intégralement lorsque la lame reviendra en arrière ; donc, ici, le ressort ne s'échauffe pas.

Mais amplifions le mouvement, de manière à *dépasser* la

limite d'élasticité : à chaque changement de sens, nous devons détruire la déformation permanente résultant de la traction précédente, et ceci détermine des frottements moléculaires à la faveur desquels une partie de l'énergie que nous dépensons apparaît sous forme de *chaleur*. Ce dégagement de chaleur devient même très intense si nous poussons ces frottements moléculaires à l'extrême, ce qui est le cas, par exemple, quand, faute de pinces coupantes, nous tordons, pour le rompre, un fil de fer dans nos doigts impatients. Or, puisque chaque fois que nous magnétisons le fer, nous lui faisons subir une déformation permanente, il est naturel que, si nous le soumettons à des variations d'aimantation rapides, nous perdions, sous forme d'échauffement par les frottements moléculaires, une partie de l'énergie appliquée. Ce n'est pas pour une autre raison que l'hystérésis fait chauffer le fer des induits de dynamos, qui sont soumis à des variations d'aimantation extrêmement intenses et énergiques, puisque le champ qui les traverse s'inverse deux fois par tour par suite de leur rotation.

D'après cette explication, il est bien évident que, malgré qu'ils se manifestent tous deux de la même façon, par l'échauffement des masses de fer soumises aux variations de champ, hystérésis et courants de Foucault sont deux phénomènes *absolument distincts*.

L'hystérésis ne dépend que du volume du fer qui lui est soumis : on ne le change en quoi que ce soit en feuilletant ce fer, tandis qu'on atténue ainsi autant qu'on veut les courants de Foucault. En outre, l'importance des pertes par hystérésis est constante pour un tour, *quelle que soit la vitesse*, de même que la déformation permanente d'un ressort dont on dépasse la limite d'élasticité est atteinte immédiatement, quelle que soit la vitesse avec laquelle on tire la lame ; au contraire, l'énergie absorbée dans un tour par les courants de Foucault est d'autant plus grande que la vitesse est plus considérable.

En n'employant pas des vitesses trop élevées et en poussant assez loin la division du fer, on peut donc arriver à réduire à peu de chose les pertes par courants de Foucault, tandis que pour l'hystérésis, il n'y a rien d'autre à tenter que de prendre du fer de bonne qualité et de ne pas le soumettre

à des déformations moléculaires extrêmes, c'est-à-dire à des champs extrêmement intenses.

Si ces conditions sont réalisées, les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont à peu près égales et ne doivent pas dépasser 5 à 6 0/0.

COLLECTION DU COURANT

Collecteur. Calage des balais. — Revenons à notre anneau Gramme.

En pratique, on ne s'amuse pas à dénuder la surface extérieure des fils de l'induit pour y faire frotter des balais[1]. La vitesse à la périphérie est trop grande, les fils seraient vite coupés par le frottement et, en outre, cette partie de l'anneau est généralement peu accessible, puisqu'elle est enserrée (Voyez *fig.* 111) entre les deux mâchoires du système inducteur.

On se sert donc, pour recueillir le courant, d'un *collecteur* que représente la figure 113 et qui, solidaire de l'anneau, est calé sur le même arbre que lui. Les différentes *sections* du collecteur, lames de cuivre séparées par une matière isolante, sont reliées à des points équidistants du fil de l'anneau et sont, par conséquent, portées au même potentiel que ces points. La répartition du potentiel sur le collecteur est donc la même que sur l'anneau, et on fait alors frotter les balais sur les points de ce collecteur correspondant aux points A et B de l'anneau, ou plutôt légèrement *en avant* de cette position, dans le sens du mouvement, d'autant plus en avant que le débit est plus considérable.

Ce léger *décalage des balais*, d'autant plus grand que l'anneau débite plus, est dû à ce que le courant créé dans l'induit produit lui aussi un champ magnétique, lequel réagit sur le champ

1. Pas plus ici qu'ailleurs il n'y a de règle sans exceptions et, par exemple, dans certaines dynamos de la *Société alsacienne*, les balais frottent directement sur l'induit.

inducteur (loi de Lenz, p. 189) et en change la disposition d'autant plus qu'il est plus intense.

C'est là ce qui constitue la *réaction de l'induit.*

En pratique, il faut *caler* les balais dans la position où ils *crachent* le moins, où les étincelles produites sous ceux-ci sont le plus faibles possible.

Quant à ces étincelles, elles sont provoquées par le fait que chaque fois que deux lames successives du collecteur passent sous un balai, les spires correspondantes de l'anneau quittent une moitié de celui-ci où le courant est d'un certain sens, pour entrer dans l'autre, où il est de sens inverse. Le courant

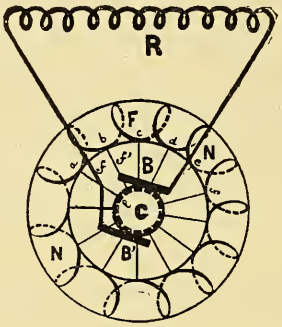


Fig. 113. — Principe du collecteur.

doit donc s'inverser brusquement dans ces spires et, comme elles opposent à ce changement brusque une grande résistance en vertu d'une sorte d'*inertie magnétique* que nous étudierons plus loin sous le nom de self-induction (p. 250), le courant préfère arriver au balai par un chemin moins pénible, qui est l'espace d'air compris entre le balai et la lame du collecteur qu'il vient de quitter.

D'où la production d'une étincelle qui se renouvelle au passage de chaque lame, détériore collecteur et balais, vit aux dépens de l'énergie motrice et enfin — quel réquisitoire ! — empêche de tirer d'une dynamo toute la puissance possible.

De savantes études ont permis, heureusement, de réduire à fort peu de chose ce feu d'artifice de mauvais goût, et les balais des machines actuelles — plus dociles aux suggestions du

Comité consultatif d'hygiène que nombre de Parisiens — ne crachent presque plus.

PRODUCTION DU CHAMP INDUCTEUR

Excitation séparée. — Comment fabriquer le champ magnétique dans lequel se meut l'induit ?

La première idée qui vient à l'esprit, c'est d'employer comme inducteur un puissant aimant permanent. On a ainsi une machine *magnéto*-électrique.

Le champ, alors, ne coûte rien.

C'est ainsi que procédèrent les premiers inventeurs.

Aujourd'hui, les machines magnéto font le plus bel ornement de nos musées d'antiquités ; dans toutes les machines modernes — sauf minuscules exceptions — le champ inducteur est obtenu par l'excitation d'*électro-aimants* appropriés. Singulier progrès, pensez-vous, d'aller chercher dans une excitation coûteuse un champ magnétique qui pourrait être gratuit !

Progrès énorme, cependant, car le fer est beaucoup plus *perméable* aux lignes de force que l'acier, et on peut, à son aide, diminuer énormément la résistance magnétique. Il est dès lors facile d'obtenir une aimantation à laquelle l'aimant permanent ne permettrait pas d'arriver. Il est bien vrai qu'on est forcé d'*exciter* l'inducteur et que le champ n'est plus gratuit comme lorsqu'il est produit par un aimant, mais on préfère de beaucoup consentir à ce sacrifice, en somme assez faible et largement racheté.

Quant aux moyens de réaliser cette excitation, il y a différentes manières de procéder.

On peut tout d'abord exciter les inducteurs à l'aide d'une source auxiliaire, par exemple, d'une pile.

C'est l'excitation dite *séparée*.

On ne procédait pas autrement avec les premières machines dynamos (*fig.* 114). Mais c'est bien ennuyeux, cette source extérieure, c'est bien de la complication pour pas grand'chose,

puisque dans l'excitation nous dépensons peut-être bien 10 watts, alors que l'induit nous fournit 100, 200, 500 watts.

Auto-excitation. — N'y aurait-il donc pas moyen de se servir d'une partie de ces 100, de ces 200, de ces 500 watts, de leur emprunter les 10 watts nécessaires pour réaliser l'excitation et remiser avec toutes sortes d'égards notre source auxiliaire devenue superflue ?

Mais l'embarrassant, c'est de se mettre en route : il faut du

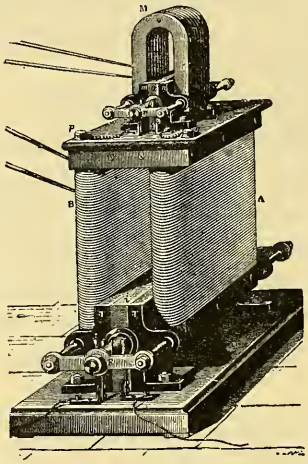


Fig. 114. — Machine à excitation séparée de Wilde.
La petite machine qui se trouve à la partie supérieure est une magnéto qui sert d'excitatrice.

courant pour commencer à exciter; mais, d'autre part, il faut commencer à exciter pour avoir du courant : le cercle vicieux semble de toute première qualité !

Deux électriciens, pourtant, ne s'en effrayèrent pas.

Il est vrai qu'ils s'appelaient Siemens et Wheatstone.

Chacun de leur côté, ils retournèrent la question, et le résultat de leurs méditations fut que l'industrie, du jour au lendemain, se trouva pourvue de deux modes d'*auto-excitation* tout à fait différents.

Qu'est-ce que l'auto-excitation ?

C'est l'application fort inattendue d'un phénomène bien mince dont nous avons déjà parlé à propos de l'hystérésis, le

magnétisme rémanent. L'aimantation est comme la calomnie : quand elle a passé quelque part, il en reste toujours quelque chose ; quand un morceau de fer, même très pur, a été aimanté une seule fois dans son existence, il conserve indéfiniment une aimantation résiduelle, qui constitue le magnétisme rémanent.

Imaginons dès lors un anneau comme celui que nous avons décrit tournant entre les deux pièces polaires d'un électro, et supposons que les balais mettent l'induit en relation avec les deux extrémités de l'enroulement de cet électro (*fig.* 115).

En vertu du magnétisme rémanent de ce dernier, un très faible champ magnétique existe, dont les lignes de force traversent l'anneau en mouvement et suffisent pour créer une

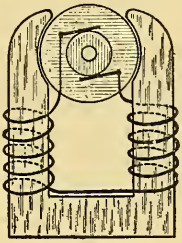


Fig. 115. — Principe de l'auto-excitation.

faible f. é. m. Si faible qu'elle soit, cette f é. m. n'en provoque pas moins un certain courant qui vient circuler dans l'enroulement de l'inducteur et *augmente l'aimantation*.

Le champ augmentant, la f. é. m. développée par l'anneau augmente aussi, envoie un courant plus fort qui provoque une aimantation encore plus forte, et ainsi de suite. Si on approche en effet un morceau de fer des pôles de l'électro, il est facile de constater *pendant plusieurs secondes* une augmentation constante de l'attraction. Finalement, la f. é. m. atteint un certain état d'équilibre qui dépend des conditions de construction de l'induit et de l'inducteur, de l'excitation, de la vitesse, etc., et aussi de l'état de *saturation* plus ou moins grande du fer.

Tel est le secret de l'auto-excitation des dynamos.

MODES D'EXCITATION DES DYNAMOS

Excitation en série ou en dérivation. — Il est vrai que cela n'est pas suffisant.

Nous ne serions guère avancés, en effet, si nous ne pouvions réaliser en pratique que le dispositif qui vient d'être indiqué, si, en d'autres termes, la force électromotrice créée par cette auto-excitation n'avait d'autre occupation que d'entretenir elle-même sa précieuse existence.

Rien n'empêche, fort heureusement, de l'employer *en même temps* pour produire des effets électriques utiles dans un circuit extérieur.

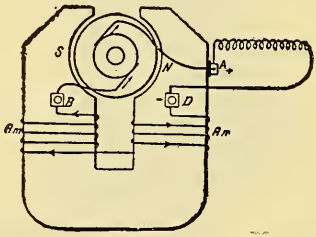


Fig. 116. — Excitation en série.

Il y a même deux manières de procéder pour cela. Comme nous l'avons dit, Siemens et Wheatstone ont découvert simultanément le principe de l'auto-excitation, en 1866, en opérant chacun d'une façon différente.

Siemens (*fig.* 116) fit circuler *la totalité* du courant produit par l'induit successivement dans l'inducteur, puis dans le circuit extérieur à alimenter. Le fil de l'inducteur est gros et court, de sorte qu'une faible portion seulement de la f. é. m. produite y est absorbée, tandis que le reste est absorbé dans le circuit extérieur. Le raisonnement que nous avons fait tout à l'heure pour expliquer l'amorçage de la dynamo s'applique ici textuellement.

Wheatstone, au contraire, ne prit qu'*une petite partie* du courant total pour l'envoyer dans les inducteurs.

Mais, par compensation, ce courant ne sert qu'à l'excitation, au lieu de pouvoir servir en même temps à autre chose.

L'enroulement des inducteurs est donc placé *en dérivation* sur les balais de la machine, ceux-ci alimentant en outre le circuit extérieur.

L'amorçage se produit encore de la même façon que nous avons indiquée.

Ici, l'enroulement de l'inducteur est beaucoup plus long et plus fin que dans l'autre cas, de sorte que les ampères-tours nécessaires à l'aimantation (voir p. 108), au lieu d'être produits par beaucoup d'ampères et peu de tours, le sont par beaucoup de tours et peu d'ampères.

Pour rappeler leur mode d'excitation, les dynamos excitées

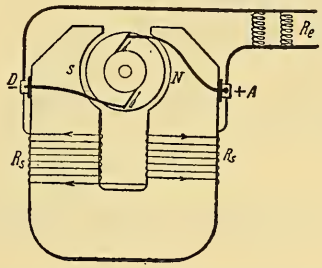


Fig. 117. — Excitation en shunt ou en dérivation.

par le procédé de Siemens sont appelées dynamos *en série*, et les autres, dynamos *en dérivation* ou dynamos *shunt*.

Ces deux groupes de machines présentent dans leur fonctionnement des différences essentielles qui leur valent de convenir chacune à certaines applications; ces différences se manifestent dès leur mise en marche :

Faisons tourner une dynamo série en laissant ouvert le circuit extérieur, c'est-à-dire *à vide :* aucun courant ne circulant dans les inducteurs, la dynamo ne peut s'amorcer.

Au contraire, une dynamo shunt s'amorce très bien *à vide*, parce que le circuit des inducteurs, lui, est toujours fermé sur les balais. Il peut donc s'y produire cette succession d'effets croissants qui constituent l'amorçage.

En cours de fonctionnement également, les deux sortes de machines se comportent très différemment :

Plus une machine série débite, plus l'aimantation devient énergique, puisque tout le courant passe à travers l'inducteur[1]. Donc, plus la f. é. m. devient grande.

La conclusion est facile à comprendre, et elle est à retenir :

Si on diminue par trop la résistance extérieure, en alimentant, par exemple, des lampes en dérivation trop nombreuses, l'induit sera *brûlé* par le courant trop énergique.

Avec une dynamo shunt, au contraire, pareil fait ne pourra jamais se produire : supposons qu'on augmente le débit demandé à la machine, la perte de potentiel dans l'induit augmente, donc le courant qui circule dans l'électro, dont la valeur est affectée par ce fait, décroît aussi, ce qui est une

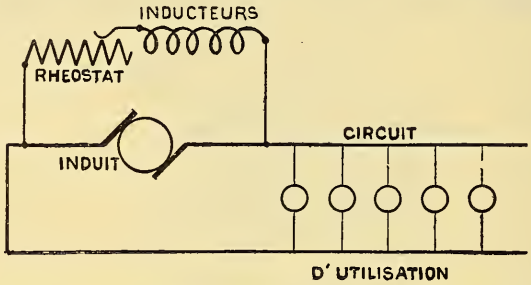


Fig. 118. — Régulation de la diff. de pot. aux bornes par un rhéostat d'excitation.

cause de désaimantation, et, par conséquent, de diminution de la f. é. m. et de nouvelle diminution de la diff. de pot. aux bornes. Ainsi, quand on *augmente* le débit demandé à une machine shunt, la f. é. m. *diminue*, contrairement à ce qui se passe dans une machine série. Si donc on met une dynamo shunt en *court-circuit*, ce fait, qui ferait griller infailliblement l'induit d'une machine série, n'a ici d'autre conséquence que de faire tomber à zéro la diff. de pot. aux bornes, et de désamorcer la machine.

Réglage de l'excitation. Excitation compound. — L'un des emplois les plus importants des machines shunt consiste dans l'alimentation des circuits d'éclairage.

---

1. Toutefois, lorsque l'excitation devient très grande, l'aimantation du fer tend vers une limite qu'on appelle la *saturation magnétique*.

Or, nous venons de voir que ces dynamos se comportent comme des piles, en ce sens que, quand le débit augmente, la diff. de pot. aux bornes baisse par suite de la résistance intérieure, qui est ici la résistance de l'induit. A la vérité, la résistance intérieure des grandes dynamos employées sur les circuits d'éclairage est très faible, mais, d'autre part, les débits qu'on leur demande sont énormes, de sorte que les variations de tension, quoique moins accentuées que dans le cas de l'éclairage par piles, seraient encore trop grandes pour être acceptables sur un réseau d'éclairage. Heureusement, cet inconvénient est diminué en introduisant dans le circuit des électros une résistance additionnelle dite *rhéostat d'excitation* (*fig.* 118), ré-

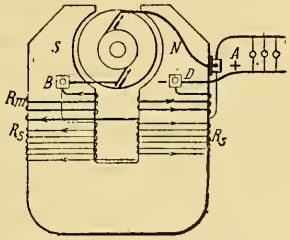


Fig. 119. — Excitation compound.

glable à volonté. Quand le débit est faible, la diff. de pot. aux bornes de la dynamo a des tendances à être trop élevée : on laisse alors dans le circuit d'excitation toute la résistance du rhéostat. A mesure que les abonnés allument, le courant augmente : la diff. de pot. aux bornes tend à diminuer ; on retire progressivement de la résistance en déplaçant une manette sur des touches successives entre lesquelles la résistance additionnelle est intercalée par fractions. On augmente ainsi le courant d'aimantation et on peut arriver à maintenir la différence de potentiel assez constante pour satisfaire les abonnés : Dieu sait pourtant que ce n'est pas commode!

Signalons encore les machines *compound*, dans lesquelles la combinaison des propriétés de l'enroulement en série (f é. m. croissante avec le débit) et de l'enroulement en dérivation (débit croissant, f. é. m. décroissante) est mise à profit pour

maintenir *automatiquement* une diff. de pot. constante aux bornes, *quel que soit le débit.* Ces machines sont employées quand les variations de débit sont trop brusques pour pouvoir être suivies aisément, comme c'est le cas, par exemple, pour les machines génératrices employées dans les usines de traction électrique.

RÉSUMÉ

Une spire conductrice, tournant uniformément dans un champ magnétique autour d'un axe perpendiculaire aux lignes de force et situé dans son plan, produit une f. é. m. variable à chaque instant, mais *toujours de même sens* dans la moitié de tour située du côté d'un des pôles inducteurs, toujours de sens opposé dans l'autre moitié.

On en conclut facilement que, si, au lieu d'une spire, on en considère une série, reliées les unes aux autres en forme d'anneau tournant dans un champ supposé horizontal, les deux moitiés droite et gauche de celui-ci sont le siège de f. é. m. *constantes*, égales et opposées l'une à l'autre. A l'aide de balais conducteurs frottant l'anneau suivant une ligne verticale (à la *réaction d'induit* près), on peut utiliser la f. é. m. constante ainsi obtenue à débiter sur un circuit extérieur du courant *continu*.

Tel est le principe de l'*anneau Gramme.*

Les spires doivent être enroulées sur un anneau *en fer*, destiné à diminuer le plus possible la résistance magnétique, qui s'opposerait à la production de flux intenses. Pour cette raison aussi l'*entrefer* doit être très petit. L'anneau doit être constitué par des tôles ou fils de fer vernis disposés suivant le parcours des lignes de force, afin de réduire à peu de chose les *courants de Foucault* qui se produisent dans les masses métalliques non sectionnées soumises à des variations de flux rapides. L'anneau est, en outre, le siège d'un autre phénomène parasite, l'*hystérésis*, qui absorbe aussi en pure perte une certaine quantité d'énergie et qui est dû à une déformation moléculaire exagérée du fer sous l'influence de champs intenses.

Au lieu de faire frotter les balais sur les fils de l'anneau lui-même, qui s'useraient rapidement, on les fait, en général, frotter sur un *collecteur*, dont les différentes lames, isolées les unes des autres, sont reliées à des spires équidistantes de l'anneau.

Pour produire le champ inducteur dans lequel se déplace l'anneau, on ne se sert plus d'aimants permanents, qui ne permettent pas

une induction assez intense. On a recours à l'*auto-excitation*, qui consiste à faire passer dans les bobines des inducteurs soit la totalité du courant produit (machines *série*), soit une faible partie de celui-ci (machines *shunt*). L'amorçage initial est dû au *magnétisme rémanent*.

CHAPITRE QUINZIÈME

EXAMEN DE QUELQUES TYPES DE MACHINES A COURANT CONTINU

Les dynamos que l'on rencontre dans l'industrie sont très variables d'aspect. Mais — doit-on le dire? — cette séduisante variété n'a pas eu de causes plus profondes que la nécessité dans laquelle les construc teurs désireux de faire passer leur nom à la postérité se sont trouvés de faire preuve d'imagination pour ne pas se copier trop manifestement les uns les autres. Indéfiniment calqués sur quelques types caractéristiques, les différents modèles sont identiques quant aux principes, et les différences de fonctionnement sont bien légères; la plupart des dynamos industrielles actuelles sont d'excellents outils transformant en énergie électrique jusqu'à 96 0/0 de l'énergie mécanique qu'on leur offre. Aussi bornerons-nous notre rapide examen à l'étude des principaux de ces différents types.

Machine magnéto de Gramme. —La figure 120 montre — à titre historique — une machine magnéto de Gramme, type de laboratoire. Un anneau Gramme y tourne entre les deux pôles d'un puissant aimant feuilleté Jamin. Vous vous apercevez aisément qu'aux temps reculés où l'on construisait ces machines, les principes du circuit magnétique dormaient en paix dans la cervelle de leurs futurs inventeurs. Les pauvres lignes de force devaient bien s'essouffler à parcourir le chemin étroit et long à plaisir qu'on leur avait réservé!

Utilisation de l'énergie humaine. — Comme on le voit, cette magnéto était destinée à être mue par le pied de l'expérimentateur et à transformer en énergie électrique l'énergie *humaine*.

A ce propos, disons incidemment quelques mots d'appareils plus modernes et mieux combinés destinés au même but. En ce temps de cyclisme, la question peut avoir son intérêt.

Ce n'est pas, en effet, une énergie négligeable, tant s'en faut, que le

bicycliste dépense sur son cheval — même sans chercher à battre des records. — La puissance développée peut quelquefois atteindre et dépasser 10 kilogrammètres par seconde : or, 10 kilogrammètres par seconde, cela fait 100 watts, et une batterie de piles de 100 watts a déjà l'air d'un outil qui veut devenir quelque chose. Si ces 100 watts étaient transformés en puissance électrique par une petite dynamo ayant 70 0/0 de rendement, chacun de nous pourrait produire dans sa journée 2/3 de kilowatt-heure. Il n'y a pas à rire, c'est là de l'énergie

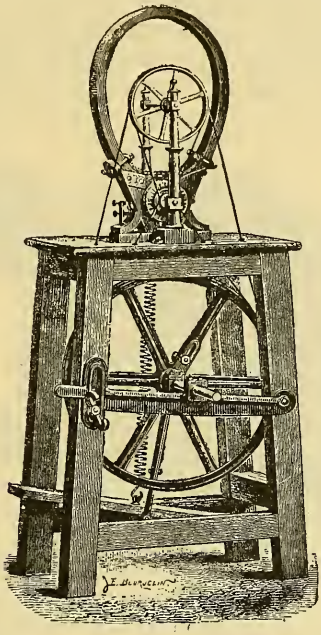


Fig. 120. — Machine magnéto de Gramme.

pas beaucoup plus coûteuse que celle de la pile... surtout si l'on fréquente les restaurants à 1 fr. 10.

Aussi un constructeur a-t-il eu l'idée de mettre à la disposition des fanatiques du cyclisme, désœuvrés par le mauvais temps, un outil qui leur permette d'utiliser leur bicyclette pour moudre, à défaut de kilomètres... des volts et des ampères. Une petite dynamo est tout simplement mise en mouvement à l'aide de la roue motrice du vélo, légèrement soulevée de terre. On peut charger, à l'aide du courant fourni, une batterie d'accumulateurs, et, si la maison compte quelques fanatiques de la bête d'acier, on peut l'inonder de flots de lumière.

Plus d'un amateur d'électricité de ma connaissance trouverait son compte, sous couleur de philanthropie, à licencier ses piles et à faire *trimer* de pauvres diables sur un outil de ce genre.

Groupes d'éclairage domestique. — Un autre moyen pour l'amateur de se procurer la force motrice nécessaire consiste à la demander au vent, car, en dépit du bon La Fontaine, il y a dans le vent autre chose que... du vent et on construit maintenant des « turbines atmosphériques » qui permettent d'utiliser très efficacement l'énergie qu'il renferme. Seulement, quelque perfectionné que soit le système, il n'empêche pas le vent d'être plus capricieux encore, et la nécessité s'impose de compléter l'installation par des accumulateurs, qui recevront le trop-plein de l'énergie les jours d'abondance pour le restituer dans les périodes de disette. Si l'on veut être tout à fait sûr du lendemain, il pourra être préférable de se procurer un de ces petits moteurs à gaz ou à pétrole que l'industrie établit main-

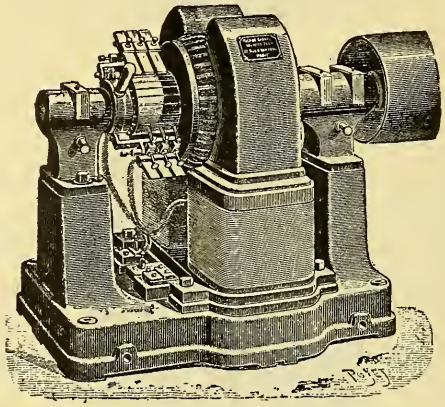


Fig. 121. — Machine Gramme, type supérieur.

tenant à bon compte. La maison de Dion-Bouton, par exemple, a combiné de petits groupes moteur-dynamo qui résolvent d'une façon parfaite le problème de l'éclairage des châteaux ou des fermes et de l'utilisation annexe de l'énergie électrique à tous les emplois, force motrice, recharge d'accumulateurs d'automobiles... que les circonstances peuvent suggérer.

Machine Gramme, type supérieur. — Relativement à son aînée, la machine que représente la figure 121 est une application plus sérieuse de l'anneau Gramme à la production de l'énergie électrique.

C'est une machine remarquable par la sobriété et l'élégance de ses formes.

L'induit est à la partie supérieure de l'ensemble, d'où le nom de *type supérieur* Gramme donné à ce modèle par opposition au *type inférieur* du même constructeur. Le nom ne fait donc rien à la qualité, comme on pourrait le croire.

On voit que l'excitation est obtenue à l'aide d'un *électro* en forme de fer à cheval : c'est à une *dynamo* que nous avons affaire ici.

On voit aussi que le circuit magnétique a été ramené à des proportions plus logiques que dans la magnéto précédemment décrite : l'inducteur est très ramassé, laissant tout juste la place nécessaire pour l'enroulement des bobines excitatrices.

Dynamo à pôles conséquents de Bréguet. — Au lieu de l'inducteur en fer à cheval, on préfère souvent — affaire de goût? non, pas absolument; affaire aussi de place pour enrouler le fil inducteur — un modèle d'inducteur dont la machine Bréguet (*fig.* 122) est une application. Dans ce modèle, il n'y a toujours que deux

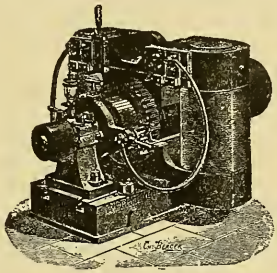


Fig. 122. — Machine Bréguet à pôles conséquents.

pôles, bien qu'il y ait, à proprement parler, deux circuits magnétiques différents. Les deux parties de l'inducteur sont montées l'une par rapport à l'autre en *opposition*, comme deux piles en quantité, et elles envoient chacune leur flux dans l'induit.

MACHINES MULTIPOLAIRES

Dans les grandes machines comme celles qui sont maintenant employées dans l'industrie, il est difficile de donner à l'induit une très grande vitesse angulaire : l'énorme force centrifuge qui serait développée serait dans le cas de se livrer à des fantaisies regrettables :

On a donc dû chercher des artifices pour réduire le plus possible cette vitesse.

Le principal de ces artifices consiste à employer, au lieu de deux pôles magnétiques diamétralement opposés (*fig.* 110), plusieurs paires de pôles disposés tout autour de l'induit.

On saisit de suite l'avantage.

Le flux magnétique circule dans celui-ci comme l'indique la figure 123, relative à 4 pôles, et il résulte de cette disposition que la f. é. m. de chaque spire de l'anneau s'inverse 4 fois au lieu de 2 à

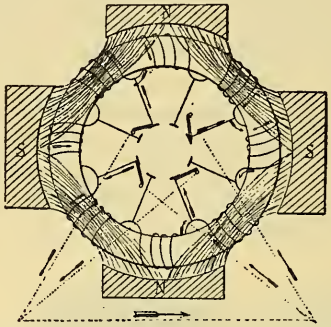


Fig. 123. — Répartition du flux dans une machine à 4 pôles.

chaque révolution (Voir p. 188) : on produit ainsi, à égalité de vitesse et d'intensité de champ, une f. é. m. 2 fois plus grande. Ou, ce qui revient au même, on peut faire tourner 2 fois moins vite et avoir la même f. é. m. De même, avec une machine à 6 pôles, à 8 pôles, on peut tourner 3, 4 fois moins vite.

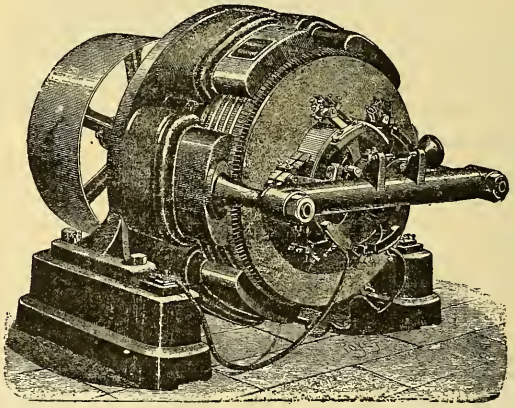


Fig. 124. — Machine multipolaire Gramme.

Il faut autant de paires de balais que de paires de pôles.

La figure 124 montre comment on a tiré parti de ces considérations dans la machine à 6 pôles de Gramme, et la figure 125 représente une des machines à 6 pôles couramment employées par la Compagnie Thomson-Houston dans ses grandes usines de traction électrique.

Pour permettre au lecteur d'apprécier combien il a coulé d'eau sous les ponts depuis la pile de Volta, disons que cette dernière machine est quelque chose comme *un joujou* à côté des gigantesques dynamos que mettent en branle les eaux du Niagara!

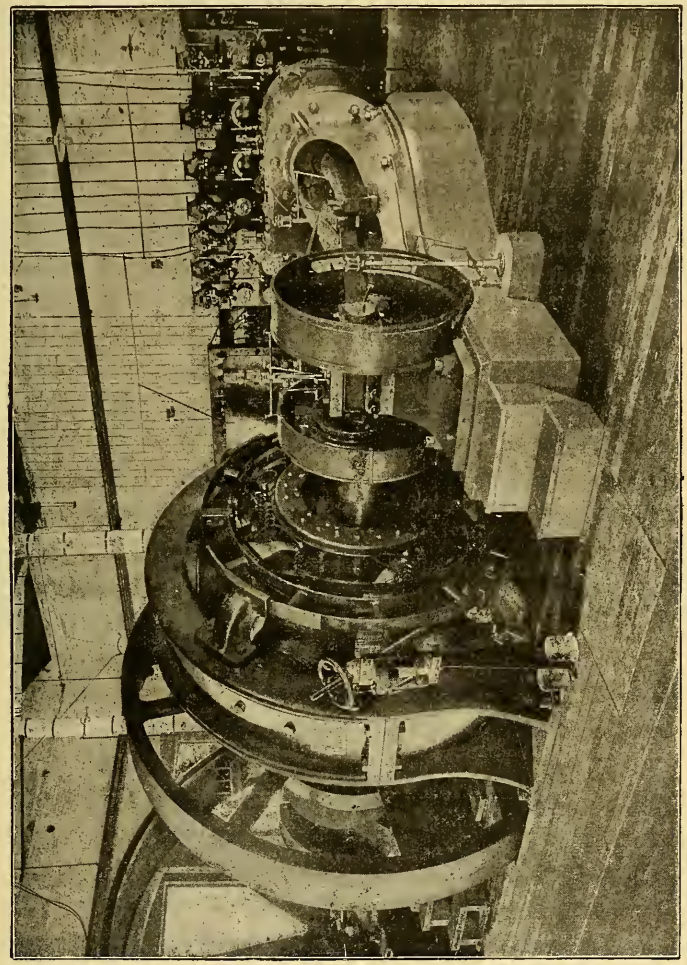


Fig. 125. — Dynamo à 6 pôles de la Compagnie Thomson-Houston.

INDUITS EN TAMBOUR

Il ne nous reste plus, pour terminer cette rapide revue, qu'à parler des machines à induit *en tambour*.

A côté des enroulements en hélice ou en *anneau*, en effet, disons qu'on utilise très souvent un mode d'enroulement très différent de

celui-là en apparence, l'enroulement en *tambour*, dont la figure 126 représente l'aspect.

La différence extérieure est grande entre ces deux enroulements ;

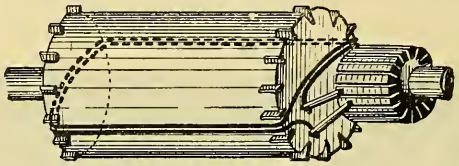


Fig. 126. — Schéma de l'enroulement en tambour.

mais la seule réelle qui existe entre eux ressort nettement de la comparaison entre les figures 108 et 127. Dans la figure 108, on voit une spire tourner autour d'un axe XX qui lui est extérieur : c'est le type

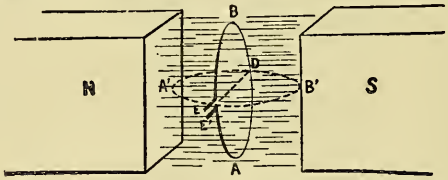


Fig. 127. — Principe de l'enroulement en tambour.

des spires des induits en anneau. Dans la figure 127, au contraire, la spire tourne autour d'un de ses diamètres : c'est la caractéristique des induits en tambour. Les mêmes raisonnements dont l'anneau

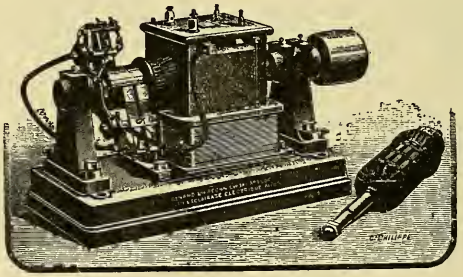


Fig. 128. — Machine Rechniewski.

Gramme a été l'objet sont applicables à la théorie des induits en tambour et nous amèneraient à des conclusions identiques; aussi nous garderons-nous de les recommencer.

Il ne faudrait pas croire, malgré cela, que ces machines sont peu employées dans l'industrie. Peut-être, au contraire, existe-t-il de

plus nombreux représentants du tambour que de l'anneau. Le motif en tient à diverses raisons, dont la plus facile à saisir est que le fil de l'enroulement en tambour est tout entier *extérieur* au cylindre de fer qui sert de support, ce qui n'est pas le cas pour l'anneau : l'enroulement est donc industriellement plus facile à réaliser.

La machine Rechniewski (*fig.* 128) représente un type d'application du mode d'enroulement en tambour. Elle présente, d'ailleurs, une particularité très intéressante. L'induit est *denté*, le fil est logé dans le creux des dents. Par conséquent, il n'existe pas entre le fer de l'inducteur et le fer de l'induit la couche de fil non conductrice — magnétiquement parlant — qui y est généralement interposée. C'est un nouveau gain réalisé sur la résistance magnétique, et ce gain se traduit par ce fait que ces machines sont plus légères que les autres à puissance égale.

CHAPITRE SEIZIÈME

MOTEURS A COURANT CONTINU

Réversibilité des formes électrique et mécanique de l'énergie. — L'incomparable faculté de transformation qui caractérise l'énergie électrique va nous permettre maintenant d'aborder un ordre d'applications bien différentes de celles que nous avons rencontrées jusqu'ici, les applications mécaniques de l'électricité.

De même, en effet, que les actions chimiques et électriques sont réversibles (Voir p. 125), de même les formes électrique et mécanique de l'énergie peuvent se transformer de l'une à l'autre avec la plus extrême facilité.

Des exemples de cette réversibilité vous sont déjà familiers. Ainsi, vous savez que si un aimant se déplaçant dans une bobine y produit un courant (expérience de Faraday, point de départ des dynamos), réciproquement, un courant circulant dans cette bobine détermine l'attraction de son armature, produisant par suite *un effet mécanique*. Ces faits connus, il ne nous reste plus qu'à chercher le moyen de réaliser cette transformation dans les meilleures conditions possibles.

Il y a très longtemps déjà qu'on s'est aperçu de tous les avantages qu'une telle transformation pourrait présenter dans bien des cas, et ce n'est pas d'hier que le problème des *moteurs électriques* est posé.

On a cru tout d'abord en trouver la solution dans un simple perfectionnement de l'électro-aimant.

C'est ainsi que Froment construisit un moteur consistant en un puissant électro-aimant attirant *successivement*, grâce à des émissions de courant savamment combinées, des palettes de fer

disposées à la périphérie d'une roue qui prenait un mouvement de rotation extrêmement rapide.

C'était très imposant à voir tourner.

Mais s'avisait-on de gêner avec les doigts le déplacement des palettes, il n'en fallait pas plus pour calmer cette belle ardeur et tout réduire à l'immobilité.

Comme le moteur Froment resta pendant longtemps l'idéal du genre, on conçoit que pendant bien des années on ait considéré le problème des moteurs électriques comme fort difficile à résoudre ; mais on alla plus loin et on ne se gêna pas pour répéter sur tous les tons que le moteur électrique ne serait *jamais pratique !* Le fait n'est pas malaisé à vérifier : cette affirmation téméraire est écrite en toutes lettres sur des traités datant d'une trentaine d'années.

Or, les prophètes d'occasion qui affirmaient ceci avaient le nez si creux que, lorsque les dynamos à courant continu vinrent donner le moyen de produire économiquement l'électricité, l'une des premières propriétés qu'on leur découvrit fut que précisément elles constituaient en même temps des moteurs admirables : Leur fournissait-on de l'énergie mécanique en les faisant tourner, elles produisaient du courant électrique ; leur donnait-on, au contraire, du courant, elles se mettaient à tourner avec rapidité en restituant, sous forme de travail mécanique, l'énergie électrique fournie. Ceci aussi bien que cela d'ailleurs avec un rendement extraordinairement élevé. Aussi, les moteurs électriques, dont l'usage se développe si rapidement en ce moment dans toutes les branches de l'industrie, ne sont-ils que de simples dynamos, auxquelles on apporte, sous forme de courant électrique, l'énergie qui doit les mettre en branle.

Avant d'entrer dans le détail du fonctionnement de ces moteurs, essayons de nous faire de ce fonctionnement une idée approchée.

Déplacement dans un champ d'un conducteur parcouru par un courant. — Quand un conducteur appartenant à un circuit fermé est tiré dans un champ magnétique de manière à en couper les lignes de force, nous savons (p. 161) qu'il s'y produit un courant de sens bien déterminé, et que, pour opérer

ce déplacement, il nous faut développer un certain effort. Nous savons aussi, car c'est la base de l'existence des dynamos, que cet effort et ce courant sont connexes l'un de l'autre, l'énergie mécanique développée pour tirer le conducteur correspondant justement à l'énergie qui apparaît sous forme électrique.

Pour bien comprendre la façon dont le courant et l'effort sont ainsi liés l'un à l'autre et parvenir aux conclusions qui nous importent, il nous faut revenir à l'expérience d'Oersted (p. 16). Dans la forme ordinaire donnée à cette expérience, l'aiguille aimantée se déplace par rapport au courant ; mais supposez l'aiguille *fixe*, le conducteur *mobile*, et c'est celui-ci qui, pour se mettre en croix avec l'aiguille, tournera dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens du courant qui le traverse[1]. Que l'expérience soit faite sous l'une ou l'autre forme, la conclusion est nette : un courant électrique et un système magnétique, placés dans une position relative convenable, exercent l'un sur l'autre une *action mécanique* réciproque, et si l'un des systèmes est fixe, l'autre mobile, ce dernier se déplacera dans un sens bien déterminé sous l'effet de cette action.

Revenons à notre conducteur placé en travers des lignes de force d'un champ uniforme (*fig.* 87) ; le courant qui y prend naissance quand nous le tirons de manière à couper des lignes de force *réagit mécaniquement sur le champ*, d'après ce qui précède.

C'est évidemment cette réaction qui est la cause de l'effort antagoniste que nous avons à vaincre pour déplacer le conducteur, et ceci nous apprend que le courant créé dans ces circonstances doit être de sens tel que sa réaction *s'oppose* au mouvement. La loi de Lenz (p. 189), qui nous fut si précieuse, n'est qu'une interprétation de ce principe général.

Ainsi donc, l'effort qu'il nous faut exercer pour déplacer le conducteur dans notre champ uniforme est juste égal à la réaction *de sens inverse* du courant sur le champ. Supposez maintenant que nous cessions d'exercer cet effort, et ceci assez brusquement pour que le courant qui circule dans le conduc-

---

1. Remarquons-le, la position en croix est telle que le conducteur s'est disposé parallèlement aux courants fictifs qui circulent dans le solénoïde imaginaire équivalent à l'aiguille aimantée (v. p. 161) et de son côté, l'aiguille est alors placée dans la direction des lignes du champ créé par le courant (*fig.* 84).

teur n'ait pas le temps de disparaître[1]. Alors, évidemment, l'action du courant sur le champ, n'étant plus neutralisée par l'effort, réagira violemment sur le conducteur pour le ramener *en arrière* en coupant les lignes de force en sens inverse de tout à l'heure, et en produisant *de la force motrice*.

Mais ce même résultat nous pouvons l'obtenir bien plus simplement et passer définitivement de la notion de *dynamo* à celle de *moteur* en fournissant au conducteur, grâce à une source extérieure, un courant précisément *identique* à celui qui s'y créait tout à l'heure, et en le laissant libre de se mouvoir. L'effort qu'on exerçait pour *produire* le courant n'existant plus, la réaction subsistant seule, le conducteur sera dès lors sollicité à se déplacer *en sens inverse* de son mouvement comme *générateur*, et à fournir de la force motrice ; nous pourrons, grâce à ce déplacement, recueillir sous forme mécanique l'énergie développée par la source sous forme électrique[2].

1. Effectivement, ce courant ne disparaît que lentement, grâce à la *self-induction* du conducteur (v. chap. XVIII).

2. Toutes les particularités de ce mouvement d'un conducteur rectiligne parcouru par un courant en travers des lignes de force d'un champ magnétique

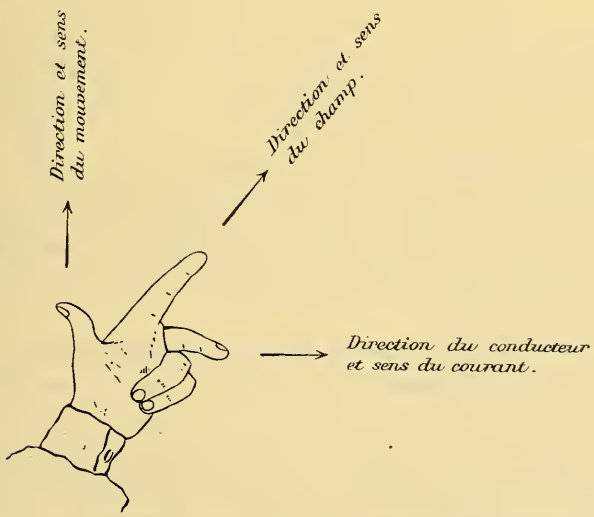


FIG. 129. — Règle des trois doigts. Cas de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique.

peuvent être prévues par une extension au cas des moteurs de la règle des trois doigts de Fleming (v. p. 164) ; mais ici, c'est la main gauche qu'il faut utiliser :

Déplacement d'une spire dans un champ. — Il est évident que cette conception simpliste d'un conducteur individuel se déplaçant parallèlement à lui-même dans un champ magnétique uniforme et indéfini est purement théorique et tout à fait insuffisante au point de vue pratique.

Comme dans le cas des dynamos, il nous faut faire une étape de plus et arriver à utiliser des champs très limités et très intenses en y faisant mouvoir indéfiniment des spires ou des bobines de fil.

Soit donc une spire conductrice ABCD suspendue dans

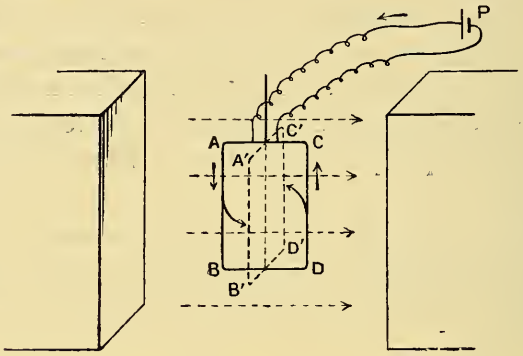


Fig. 130. — Action d'un champ magnétique sur une spire conductrice traversée par un courant.

un champ magnétique intense. Lançons y un courant à l'aide d'une source extérieure P. Nous la voyons dévier avec une énergie extrême : après quelques oscillations saccadées, elle prend une position définitive A'B'C'D', perpendiculaire à la direction du champ.

Que s'est-il passé ? Dans la position primitive de la spire, les deux côtés AB,CD, étaient disposés en travers des lignes de

---

L'index étant placé dans la direction des lignes de force du champ, le médius représentant à la fois le conducteur et le sens du courant qui le traverse, le pouce indiquera le sens du mouvement du conducteur. Supposez connus le champ et le sens du mouvement qu'on veut produire, le médius indiquera le sens du courant à employer; supposez que connaissant le sens du courant et celui du mouvement on veuille connaître le sens du champ à employer, l'index l'indiquera. Inversez le champ, le sens du mouvement s'inverse également, etc.

force. Dès lors, nous savons que la réaction du courant devait tendre à les déplacer *transversalement*, de manière à leur faire couper les lignes de force ; mais le courant dans AB allant de haut en bas, celui dans BC allant de bas en haut, AB, d'après la règle des trois doigts, s'est trouvé tiré en avant et CD en arrière. Comme AB et CD font partie d'un tout unique et rigide, le résultat de ces deux actions a été que la spire s'est trouvée amenée suivant A′ B′ C′ D′, en travers du champ magnétique : AC et BD, ne coupant pas de lignes de force dans leur déplacement, ne sont pas à considérer.

On peut envisager ce remarquable phénomène sous une autre forme particulièrement simple et intelligible (*fig.* 131).

Nous savons que le courant qui circule dans la spire y produit un champ magnétique dont les lignes de force sont dirigées suivant son axe (v. p. 161). Or la position dans laquelle elle s'installe de façon si énergique par le mécanisme que nous avons analysé est celle dans laquelle les propres lignes de son champ prennent la direction des lignes de force du champ inducteur, de même qu'un fétu de paille flottant sur un ruisseau et fixé par une de ses extrémités prendrait la direction du courant d'eau.

Ainsi, l'expérience nous montre que, lorsqu'un champ est produit à l'intérieur d'un autre et obliquement par rapport à cet autre, les lignes de force des deux champs tendent énergiquement à prendre la même direction, de sorte que, si l'un des systèmes est mobile, il est fortement sollicité à se déplacer et à amener son champ dans la direction de l'autre.

Mais il ne suffit pas que les deux champs soient amenés à la même direction. Il faut encore que leurs lignes de force soient dirigées dans le même *sens :*

Supposons qu'au moment où le champ de notre bobine C arrive en coïncidence avec le champ inducteur, nous changions le sens du courant dans C : les lignes de force de son champ changeront également de sens (p. 169) ; ceci revient à tourner notre fétu de paille de tout à l'heure, l'extrémité libre vers l'amont du ruisseau : on voit donc que C doit faire un demi-tour pour se trouver de nouveau en équilibre ; si, à ce moment, nous changeons encore le sens du courant et ainsi de suite, nous

obtiendrons un mouvement de rotation continu de la bobine qui, éternelle juive-errante, sera toujours en route vers une position d'équilibre qu'elle n'atteindra jamais.

En pratique, pour faire tourner un moteur électrique, on n'opère pas autrement. Seulement, au lieu d'une bobine unique qui produirait des efforts trop variables pendant la rotation, on dispose de toutes les spires enroulées sur l'induit d'une dynamo, qui constituent en somme autant de bobines différentes solidaires du même axe. Chacune de ces spires est placée dans le champ magnétique produit par les inducteurs, et

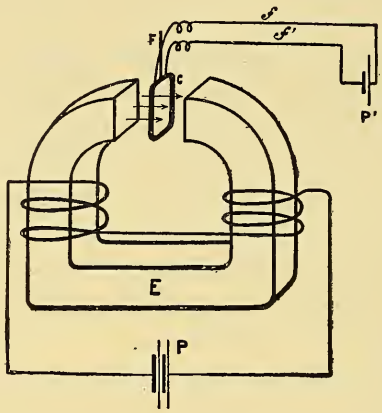


Fig. 131. — Orientation dans un champ d'une bobine parcourue par un courant.

comme elle est elle-même traversée par le courant qu'apportent les balais, elle tend à se déplacer vers la région où son propre champ se superposera exactement à celui de l'inducteur.

Déplacement dans un champ d'un anneau Gramme traversé par un courant. — Voyons les choses d'un peu plus près.

Considérons comme en page 186 une spire isolée d'un anneau Gramme tournant dans un champ (*fig.* 132) et reprenons presque textuellement le raisonnement que nous faisions tout à l'heure pour un conducteur simple.

Nous savons que si nous *forçons* cette spire à tourner dans un certain sens, de 1 vers 2 et 3 par exemple, elle va *produire*

un courant *toujours de même sens* dans toute cette moitié de tour : dans toute cette région, sauf exactement en 1, on voit que son champ est *oblique* sur le champ inducteur, et même vers 3, dirigé en *sens inverse* d'après la loi de Lenz (p. 189).

L'effort qu'il faut exercer pour faire tourner la spire est destiné, d'après notre interprétation, à vaincre la tendance du champ de la spire à se superposer au champ inducteur, ce qui tendrait à la ramener en 1.

Eh bien! imaginez que nous cessions d'exercer cet effort, et ceci assez subitement pour que le courant qui circule dans la spire n'ait pas le temps de disparaître. Alors, évidemment, la

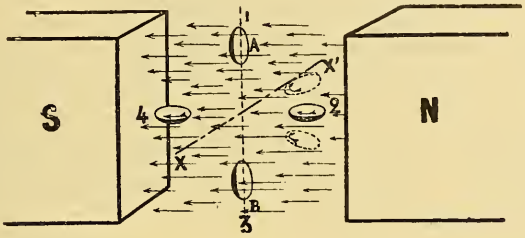


Fig. 132. — Principe des moteurs électriques

tendance à la superposition des champs, n'étant plus paralysée par l'effort, réagira violemment sur la spire pour tendre à la ramener *en arrière* en lui faisant produire de la force motrice. Or, ce même résultat, nous pouvons l'obtenir d'une façon bien plus simple et aussi prolongée que nous désirons en alimentant la spire, à l'aide d'une source extérieure, avec un courant précisément *égal et de même sens* que celui qu'elle produisait tout à l'heure, et en la laissant libre de se mouvoir.

Ce raisonnement est applicable quelle que soit la position de la spire dans la moitié de droite de l'anneau, puisque nous venons de rappeler que le sens du courant produit par la spire fonctionnant comme génératrice est toujours le même dans toute cette région.

Donc, à la seule condition d'alimenter la spire entre B et A par du courant toujours de ce même sens, elle tendra constamment à se diriger de 3 vers 2 et 1. Cette alimentation, si l'on

se rappelle que la spire n'est pas isolée, mais fait partie d'un enroulement en anneau, il est facile de voir que les balais s'en chargent tout naturellement[1].

La spire arrivant donc en A, que va-t-il maintenant se produire? On peut se le demander, car elle a trouvé là, en effet, sa position d'équilibre, ses lignes de force étant maintenant exactement en coïncidence avec celles du champ. Mais, en vertu de sa vitesse acquise et surtout de l'action solidaire des autres spires, elle passe sous le balai et pénètre dans l'autre moitié de l'anneau. A ce moment, le courant qui la traverse change de sens. Donc, le flux de la spire devient *opposé* au champ inducteur, et il faut qu'elle aille trouver sa position d'équilibre vers B, où la même chose se reproduira.

En résumé, dans un anneau Gramme alimenté par un courant extérieur, chaque spire, quelle que soit sa position, tend *toujours* à faire tourner l'anneau dans le même sens; et, d'après ce qui précède, ce sens est *inverse* de celui qui, avec le même champ inducteur, produirait le même courant si la machine fonctionnait comme dynamo.

Comme le nombre des spires est très grand, l'effort total est considérable, très régulier, et l'induit prend un mouvement de rotation extrêmement rapide.

On conclura facilement du raisonnement précédent que, pour changer le sens de ce mouvement de rotation, il est nécessaire de changer *ou* le sens du champ inducteur *ou* celui du courant de l'induit. Mais, si nous supposons que nous changeons le sens du champ inducteur, puis le sens du courant dans l'induit, la seconde opération renversant le résultat fourni par la première, nous revenons finalement au sens de rotation primitif. Donc, changer *à la fois* le sens du champ inducteur et le sens du courant de l'induit *ne change pas* le sens de rotation d'un moteur électrique.

Étude du mouvement d'un moteur électrique. — Ainsi donc, si nous relions une source d'électricité de f. é. m. constante

---

1. A condition d'en changer le sens, puisque sans cela l'induit tournerait à *contre-balais*. De plus, les balais d'un moteur doivent être calés *en arrière* du sens du mouvement.

aux balais d'un moteur électrique immobile, ce dernier se met à tourner.

Nous avons plusieurs choses à apprendre dans ce mouvement. Intercalons dans le circuit un ampèremètre : nous constatons que la déviation de l'aiguille, d'abord très grande, diminue progressivement à mesure que la vitesse s'accélère. Et cependant, nous avons un circuit dont la résistance est bien déterminée. En appelant R cette résistance et E la diff. de pot. agissante, nous devrions avoir, d'après la loi de Ohm, une intensité constante $I = \frac{E}{R}$. En réalité, l'ampèremètre nous

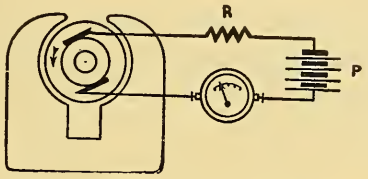


Fig. 133. — Constatation de la f. c. é. m. d'un moteur électrique.

indique qu'il n'en est pas ainsi : si nous y réfléchissons, ceci ne doit pas nous surprendre, puisque nous avons vu (p. 130) que la loi de Ohm n'est applicable à un circuit que lorsque toute l'énergie qu'on y envoie s'y dépense en chaleur ; ce n'est évidemment pas le cas ici, puisqu'une partie au moins de cette énergie apparaît en énergie mécanique dans la rotation de l'induit.

Nous sommes, en d'autres termes, en présence d'un effet qui, de même que l'électrolyse d'une combinaison chimique, *coûte* de l'énergie, et doit dès lors se traduire par l'absorption d'une partie de la puissance émise par la source.

Effectivement, l'induit d'un moteur en marche sous diff. de pot. constante développe — comme celui d'une dynamo — une f. é. m. qui augmente avec sa vitesse de rotation, puisqu'un circuit fermé s'y déplace à travers un champ inducteur.

Mais cette f. é. m. est *opposée* à la f. é. m. de la source, c'est-à-dire, suivant une expression que nous avons déjà rencontrée en électrochimie, que c'est une force *contre*-électro-

motrice. Si donc, à un moment donné, cette f. c. é. m. est E', l'intensité du courant n'est que $I = \frac{E - E'}{R}$. Comme la force contre-électromotrice de l'anneau, nulle quand le moteur était arrêté, croît à mesure que la vitesse augmente, nous concevons pourquoi notre ampèremètre nous a indiqué un courant graduellement décroissant.

Quand l'induit tourne à sa vitesse maxima, il développe une f. c. é. m. E′ presque égale à E, de sorte qu'à ce moment le courant d'alimentation est faible.

Nous verrons une application de ce fait à propos du compteur O'Keenan.

Quelle est la puissance fournie au moteur par la source d'alimentation? C'est évidemment EI. Quelle est la puissance dépensée en chaleur dans le circuit de résistance R? C'est, comme nous le savons (p. 64), RI^2 ou $RI \times I$, ou $RI \times \left(\frac{E - E'}{R}\right)$, ou enfin $(E - E')\,I$. Comme la puissance fournie par la source est EI et qu'il ne se dépense en chaleur que $(E - E')\,I$, ou $EI - E'I$, ce qui n'est pas transformé en chaleur, soit $E'I$, représente évidemment ce qui est transformé dans le moteur en puissance mécanique, c'est-à-dire la puissance *utile*.

Le rapport de la puissance mécanique ou utile $E'I$ à la puissance dépensée EI soit $\frac{E'I}{EI}$, s'appelle le *rendement* du moteur.

On voit que ce rendement est aussi égal à $\frac{E'}{E}$, c'est-à-dire au rapport de la f. c. é. m. à la f. é. m.

Quand on met le moteur en route, ce rendement commence donc par être fort mauvais, puis à mesure que la vitesse du moteur augmente, il s'améliore jusqu'à devenir excellent quand le moteur tourne à sa vitesse maxima, car, à ce moment, E' est presque égal à E. Mais alors, l'intensité est très petite, puisqu'elle dépend de $E - E'$, de sorte que la puissance mécanique développée alors est en définitive très faible : ce cas de la rotation à vitesse maxima n'est en effet obtenu que lorsque la machine tourne à vide et la petite puissance mécanique fournie dans de si bonnes conditions de rendement

n'est que justement celle qui est nécessaire pour vaincre les frottements.

Cela ne nous avance donc guère que le rendement soit excellent dans ces conditions.

Quant à la puissance développée par le moteur, ou $E'I$, elle est nulle soit quand E' est nul, c'est-à-dire au démarrage, soit quand I est nul, c'est-à-dire quand la vitesse (au moins théorique) est telle que E' est égal à E, car $I = \frac{E - E'}{R}$ se réduit alors en effet à zéro. Entre ces deux limites extrêmes, la puissance affecte une infinité de valeurs que l'on démontre passer par un *maximum* quand E' est égal à $\frac{E}{2}$. Ceci est la *puissance utile maxima* que peut développer le moteur, et on remarque que, pour ce régime, le rendement $\frac{E'}{E}$ est égal à

$$\frac{\frac{E}{2}}{E} = \frac{1}{2} \quad \text{ou} \quad 50\ 0/0.$$

Un tel rendement est bien mauvais; de plus, comme la résistance R du circuit n'est autre que la résistance intérieure du moteur, toujours très faible, le courant pour le régime de puissance maxima, soit :

$$\frac{E - \frac{E}{2}}{R} = \frac{E}{2R},$$

serait énorme et amènerait la destruction du moteur; aussi on s'arrange toujours pour ne pas trop charger les moteurs et leur permettre de tourner à une vitesse *plus grande* que celle qui correspond à la puissance utile maxima, de manière à développer une force contre-électromotrice *assez voisine de E*. Ce faisant, on améliore le rendement et on évite aux enroulements d'être soumis à des courants exagérés.

On peut remarquer l'analogie de toutes ces formules avec celles qui se rapportent à la puissance et au rendement électriques des piles (p. 71).

Une remarque curieuse, pour terminer.

La vitesse de rotation d'un moteur électrique dépend évidemment de l'intensité du champ inducteur. Ceci posé, comment agirez-vous sur celui-ci si vous avez besoin d'augmenter la vitesse d'un moteur peu chargé?

— *J'affaiblirai* ce champ, répondrez-vous, car il faudra que le moteur tourne plus vite pour créer dans ce champ plus faible la même f. c. é. m. voisine de E.

— C'est cela même : plus on affaiblit le champ, plus le moteur tourne vite. Mais je gage que, si vous n'aviez pas tourné — vous — votre langue sept fois dans votre bouche avant de répondre, vous auriez répondu... tout juste le contraire.

Il faut ajouter que, pour des raisons faciles à saisir, cette accélération de la vitesse est d'autant plus sensible que le moteur est moins chargé.

Les considérations précédentes s'appliquent d'une manière générale à tous les moteurs. Mais, en somme, nous n'avons considéré jusqu'ici qu'un moteur en quelque sorte théorique, dans lequel le champ magnétique serait fourni par une excitation séparée (ou par un aimant permanent, comme c'est le cas dans le compteur O'Keenan. En réalité, l'auto-excitation qui est généralement fournie à ces moteurs de la même façon qu'aux dynamos par un enroulement inducteur en série ou en dérivation leur confère certaines propriétés extrêmement précieuses et dont il est fort intéressant de se rendre compte.

Moteurs en série. — Examinons d'abord un moteur *série* soumis à une diff. de pot. constante E.

Lorsque ce moteur est au repos et que nous y envoyons le courant, la f. c. é. m. est nulle, de sorte que le courant I acquiert une valeur considérable, ainsi que la puissance absorbée : l'*effort* exercé sur l'induit est très grand, de sorte que le *démarrage* s'effectue avec une très grande énergie.

Propriété bien précieuse pour les moteurs de tramways, en particulier, qui sont obligés de démarrer si souvent avec des charges énormes et sur des rampes très raides.

Toutefois, le courant du début n'est pas sans présenter quelques inconvénients : il peut affecter, pendant les premières

secondes, des valeurs si élevées que l'induit pourrait en être compromis : aussi est-on obligé d'intercaler dans le circuit pendant cette période, à l'aide d'un *rhéostat de démarrage* (*fig.* 134), une résistance suffisante, qu'on retire progressivement à mesure de la croissance de la f. c. é. m.

Pour une certaine charge du moteur, celui-ci arrive à une certaine vitesse où il y a équilibre entre l'effort résistant et l'effort moteur, car, si ce dernier l'emportait, la vitesse s'accélérerait encore, tandis qu'elle diminuerait dans le cas contraire.

Supposons maintenant qu'on diminue la charge, c'est-à-dire l'effort résistant : l'effort moteur, et avec lui la puissance développée, doit diminuer aussi.

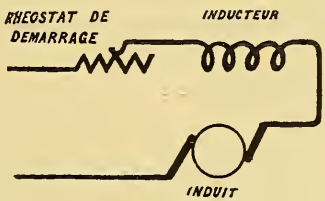


Fig. 134. — Rhéostat de démarrage d'un moteur série.

Or, cette puissance est $E'I$, et nous venons de voir (p. 227) que le moteur fonctionne toujours en pratique de manière à développer une f. c. é. m. E' voisine de E, donc peu variable avec la vitesse[1], de sorte que la puissance produite $E'I$ et, par suite, l'effort moteur, ne dépendent que de I.

Donc, lorsque nous diminuons la charge, le courant doit diminuer, ce qui exige que la f. c. é. m. augmente[2]. Pour cela, il faudrait déjà que la vitesse augmente si le flux inducteur restait constant. Comme, par dessus le marché, I diminue et le flux avec lui (puisque nous avons un moteur série), la

1. Ce qui provient de ce que, quand la vitesse d'un moteur série varie, le courant absorbé varie en sens inverse et modifie le champ inducteur de telle sorte que E' ne change presque pas.

2. Cela paraît une contradiction, puisque nous venons de voir que E' est presque constant ; mais, bien qu'il ne varie que peu, l'effet de ces variations sur a *faible* différence $E - E'$ et, par suite, sur le courant $\frac{E - E'}{R}$ est très grand.

vitesse du moteur doit augmenter *énormément* pour produire dans ce champ plus faible une f. c. é. m. plus grande (Voir p. 228).

Ainsi, dès que dans un moteur série nous diminuons la charge, la vitesse augmente beaucoup. Si nous le laissons tourner à vide, il s'*emballe* et arrive à une vitesse inquiétante, capable de compromettre sa solidité.

Pour finir cet examen sommaire, remarquons que, conformément à une remarque déjà faite (p. 224), *on ne change pas* le sens de rotation d'un moteur série en changeant le sens du courant qui l'alimente ; car, ce faisant, on change *à la fois* le sens du champ inducteur et celui du champ induit.

Pour changer le sens de la rotation, ce qui est indispensable en particulier dans les moteurs de tramways, on doit inverser le sens du courant dans l'induit *seul* ou dans l'inducteur *seul*.

Moteurs en dérivation. — Passons au moteur *shunt* ou en dérivation.

Quand l'induit est arrêté et qu'on envoie le courant aux bornes du moteur, comme la f. c. é. m. est nulle et la résistance de l'induit très faible, les inducteurs placés en dérivation sur les balais et très résistants relativement, sont presque mis en court-circuit par l'induit, de sorte que tout le courant passe à travers l'induit, presque rien, au contraire, à travers l'inducteur ; l'excitation est donc très faible et, pour peu que le moteur soit légèrement chargé, il ne peut démarrer. Il faut donc, si les circonstances s'y prêtent, le faire démarrer à vide et le charger seulement après la mise en marche.

Mais ceci n'est pas toujours possible. Quand ce ne l'est pas — ce qui serait le cas pour les moteurs de tramways — on introduit lors du démarrage (*fig.* 133) une résistance placée, non plus, comme dans le cas du moteur série, sur le circuit d'alimentation, mais, dans le circuit particulier de l'induit; de cette façon, la diff. de pot. aux bornes des inducteurs est augmentée, une partie du courant peut s'y dériver, et l'excitation se produit. A mesure de l'apparition de la f. c. é. m. aux bornes de l'induit, on enlève progressivement la résistance.

S'ils sont inférieurs aux moteurs série au point de vue de

l'énergie des démarrages, les moteurs shunt leur sont, par contre, bien supérieurs en ce qui concerne les variations de charge, auxquelles nous venons de voir que la vitesse de ceux-ci est très sensible.

Supposons qu'on décharge partiellement un moteur shunt en marche.

Comme dans le cas du moteur série, nous serons amenés à conclure que l'effort moteur, égal à l'effort résistant, ne dépend que de I. Il ne pourra donc encore diminuer que si I diminue, c'est-à-dire si E' augmente. Donc ici encore la vitesse augmentera. Mais il suffira qu'elle augmente très peu, car ici les inducteurs restent toujours soumis à la même diff. de

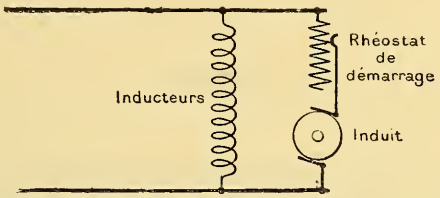


Fig. 135. — Rhéostat de démarrage d'un moteur shunt.

pot. E, et le flux ne s'affaiblit plus avec I, comme c'était le cas dans le moteur série, de sorte que l'induit n'a pas besoin d'un nouveau supplément de vitesse pour rattrapper la valeur nécessaire de E'.

Conséquence, les variations de charges *n'influent presque pas* sur la vitesse d'un moteur shunt. Un tel moteur, s'il est bien proportionné, doit tourner à une vitesse sensiblement constante, qu'il fonctionne à vide ou qu'au contraire il soit soumis à une charge très élevée. Automatiquement et sans que son allure en soit modifiée, la puissance qu'il demande à la source se proportionne à l'effort qui lui est demandé.

Propriété bien précieuse, qui appartient en propre au moteur électrique et fait que ce moteur en dérivation se plie admirablement aux besoins de l'industrie.

En outre, comme le moteur travaille nécessairement toujours très près de sa vitesse maxima, son rendement est en général meilleur que celui d'un moteur série.

A remarquer qu'ici encore le sens de rotation d'un moteur shunt est *indépendant* du sens du courant d'alimentation et que, pour le changer, il faut inverser le courant dans l'inducteur *ou* dans l'induit, ce qui se fait pratiquement en inversant les connexions des fils de l'inducteur avec les balais.

De l'examen précédent, nous pouvons conclure maintenant que pour les applications où l'énergie du démarrage est indispensable avant tout, on donnera la préférence aux moteurs en série, tandis qu'on leur préférera les moteurs shunt pour tous les cas où la régularité de la vitesse, l'impossibilité d'un emballement intempestif et un rendement élevé seront les éléments principaux à rechercher.

RÉSUMÉ

Un conducteur disposé en travers des lignes de force d'un champ et traversé par un courant subit, de la part du champ, une action mécanique qui le fait déplacer en sens *inverse* du mouvement qu'il faudrait lui donner en le tirant dans le champ pour produire ce même courant. Si le conducteur rectiligne est remplacé par une spire, la réaction du courant sur le champ a pour effet d'amener violemment celle-ci en travers du champ pour faire coïncider son champ avec le champ inducteur. Si, lorsque la spire arrive à cette position, on inverse le courant, elle doit aller chercher un demi-tour plus loin sa position d'équilibre. Si on répète indéfiniment cette opération, la spire prend un mouvement de rotation continu. Les moteurs électriques sont basés sur ce fait : au lieu d'une spire unique, on a l'action motrice concordante de toutes les spires d'un induit de dynamo, auxquelles les balais amènent précisément le courant d'alimentation dans des conditions telles que chaque spire court constamment après sa position d'équilibre : il résulte de là une rotation continue, très rapide, de sens inverse à celle du même induit considéré comme dynamo et dont on ne peut changer le sens qu'en inversant le sens du courant dans l'induit *ou* dans l'inducteur.

Cette rotation est caractérisée par la création dans le moteur en mouvement d'une force *contre*-électromotrice E' opposée à la f. é. m agissante E et par l'absorption sous forme mécanique d'une partie $E'I$ de la puissance EI fournie par la source.

Suivant que l'excitation du moteur est effectuée par un enroule-

ment en série avec l'induit ou en dérivation sur lui, ce moteur jouit de propriétés spéciales. Dans le premier cas (moteur *série*), l'énergie du démarrage est énorme, ce qui est fort précieux en particulier pour les tramways ; mais la vitesse est très variable avec la charge. Dans le second cas (moteur *shunt*), l'énergie du démarrage est faible, mais la vitesse est presque insensible aux variations de charge, la puissance absorbée se proportionnant d'elle-même à l'effort à effectuer. Ces propriétés sont extrêmement précieuses dans la plupart des industries.

CHAPITRE DIX-SEPTIÈME

APPLICATIONS DES MOTEURS

TRANSMISSION D'ÉNERGIE DANS LES USINES

Supériorité de l'électricité pour la transmission de l'énergie. — Les moteurs électriques s'adaptent admirablement à une foule de circonstances, les applications pour lesquelles leur emploi est indiqué sont aussi nombreuses que variées, et la mauvaise volonté que les industriels, ignorants de leurs qualités, ont manifestée pendant de longues années à leur égard commence à faire place à de meilleurs sentiments. Grâce à l'expérience acquise, la place du moteur électrique dans l'industrie se fait chaque jour plus large : elle deviendra prépondérante.

Quels sont les caractères essentiels de cette supériorité du moteur électrique ?

Pour répondre à cette question, il faut passer en revue ses divers modes d'application.

Reportons-nous à une usine, à des ateliers importants d'il y a quelques années. Dans un coin, une machine à vapeur empruntait au charbon l'énergie destinée à porter le mouvement à toutes les parties de l'usine. De cette machine rayonnaient dans toutes les directions des arbres de transmission qui, au moyen de poulies et de courroies, allaient porter à chaque outil une parcelle de cette énergie.

Quel enchevêtrement dans tout cela ! Quel bruit, quelles pertes aussi dans ce long transport de l'énergie exécuté d'une façon si peu commode ! Sur 100 d'énergie fournie par la machine à vapeur, c'était bien joli quand il en arrivait 50 à destination.

Ce tableau, d'ailleurs, je suis tout prêt à le reconnaître, est encore d'actualité dans maintes circonstances.

Mais retournez aujourd'hui dans cette usine, en admettant que, pour son plus grand profit, elle ait su mettre son matériel à la hauteur du progrès.

La machine à vapeur est toujours dans son coin — à moins qu'un moteur à gaz pauvre, plus économique, ne l'y ait remplacée. — Comme jadis, c'est toujours au charbon qu'elle demande l'énergie nécessaire ; mais ce n'est plus dans des arbres de transmission qu'elle déverse le produit de son travail, c'est dans une dynamo génératrice puissante.

Plus d'arbres, plus de poulies, plus de courroies !

A la place de toute cette ferraille tapageuse, quelques fils discrets, soigneusement dissimulés — en même temps qu'ils assurent un éclairage bien plus hygiénique et bien plus économique, tout en étant plus puissant — arrivent au moteur électrique qui actionne chaque outil. L'ouvrier est absolument maître de son travail ; le moteur ne marche que quand le besoin s'en fait sentir, alors que toute une immense transmission, autrefois, devait rester en mouvement pour alimenter le plus souvent quelques rares outils. Et non seulement l'énergie n'alimente chaque moteur que quand cela est utile, mais le rendement élevé de ce moteur concourt de son côté à une utilisation excellente de l'énergie dépensée.

Aussi n'est-ce pas à moins de 20 à 30 0/0 que l'on estime l'économie réalisée sur la consommation d'énergie par la substitution de la transmission électrique aux vieux procédés mécaniques.

Le prix de l'installation est, de son côté, sensiblement inférieur.

On comprend, dans ces conditions, que non seulement des usines nouvelles, chantiers, ateliers de constructions, fonderies, filatures, etc., s'établissent de tous côtés avec la distribution électrique de l'énergie comme base, mais même que d'autres, établies suivant les vieux errements, n'hésitent pas à jeter bas leurs transmissions démodées et à accorder aux moteurs électriques la place la plus large.

Mais l'électricité peut encore rendre dans des cas analogues de plus signalés services.

Souvent une usine comporte plusieurs corps de bâtiments distincts.

On était obligé autrefois de munir chacun d'eux de sa source d'énergie particulière, de sa machine à vapeur spéciale, ce qui se traduisait par une dépense d'installation et une immobilisation de personnel considérables. Avec l'électricité, on a changé tout cela ; une source d'énergie unique, de rendement excellent par suite de sa grande puissance, une dynamo alimentée par cette source, et en voilà assez pour inonder d'énergie et de lumière, par quelques câbles un peu sérieux, les différentes parties de l'usine.

UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉNERGIE DES RÉSEAUX D'ÉCLAIRAGE

Le moteur électrique dans la petite industrie. — Dans un autre ordre d'idées, il est maintenant peu de grandes villes — et

même de petites — qui ne possèdent leur canalisation électrique.

Jusqu'à présent, le rôle principal de cette canalisation s'est borné à fournir aux abonnés leur éclairage électrique. Mais cette application se résume à quelques heures de la journée, en sorte que canalisation et matériel sont fort mal utilisés (Voir, à ce sujet, page 138).

Or, pendant le jour, cette canalisation pourrait parfaitement alimenter des moteurs électriques, et cette application rendrait à une infinité de consommateurs, comme à la station électrique elle-même, les plus grands services.

Malheureusement, si les grands industriels sont à peu près tous aujourd'hui convaincus des précieux services qu'ils peuvent tirer du moteur électrique, combien de personnes ne se doutent même pas de son existence ! A cet égard, l'éducation est tout entière à faire du petit industriel, de celui qui n'a besoin pour sa fabrication que d'une très faible force motrice, et qui préfère l'emprunter à... la machine humaine, cette machine si merveilleuse, mais si détestable au point de vue économique par la cherté du combustible qui l'alimente ! Il faudrait lui révéler d'abord, lui répéter ensuite sur tous les tons, à ce petit industriel, qu'un homme qui scie du bois, par exemple, développe dans sa journée, s'il ne s'amuse pas, quelque chose comme un cheval-heure, lequel est payé au moins 4 francs, tandis que ce cheval-heure, emprunté à la canalisation d'éclairage par un petit moteur électrique commandant une scie circulaire, coûterait à peu près 40 centimes et abattrait la même besogne en une demi-heure !

Et ainsi de toutes les autres applications possibles, depuis le pétrin du boulanger jusqu'au ventilateur, en passant par le tour, la machine à coudre, la soufflerie, etc., etc.

On ne saurait trop répandre chez ces petits industriels la connaissance de ces vérités, dont la mise en pratique procurerait de si grands bénéfices. Sans compter qu'une utilisation meilleure des canalisations urbaines aurait comme premier résultat de faire baisser encore le prix déjà assez bas de l'énergie électrique consommée pendant le jour.

TRACTION ÉLECTRIQUE

Le moteur électrique était tout indiqué par ses qualités pour prendre dans la traction des véhicules une place que le cheval n'a tenue jusqu'ici que faute de concurrents.

Ce n'est pas lui qu'on peut incriminer, le pauvre ! il fait bien tout ce qu'il peut — et souvent plus — pour nous contenter.

Enfin, on s'est aperçu que le cheval coûte cher, qu'il... use fortement à circuit ouvert ; on s'est aperçu, d'un autre côté, qu'il existe certains appareils, certains moteurs série qui, par l'énergie énorme

développée aux démarrages (p. 228), semblaient avoir été créés et mis au monde exprès pour s'adapter aux roues des tramways ou des locomotives (*fig.* 136).

On fit cette adaptation pour la première fois en France — naturellement — et les visiteurs de l'Exposition d'électricité de 1881 se rappellent ce véhicule qui prenait sa nourriture en l'air et qui stupéfia tout le monde par l'élégance de ses allures.

Ce brillant début eût dû être décisif. Mais si en France on entreprend beaucoup de choses, on n'a pas la patience d'en mener beaucoup à bien ; si, non sans mal, le tramway électrique s'est implanté chez nous, il a d'abord fallu que tous les autres modes de traction aient disparu devant lui aux Etats-Unis et dans pas mal de villes européennes.

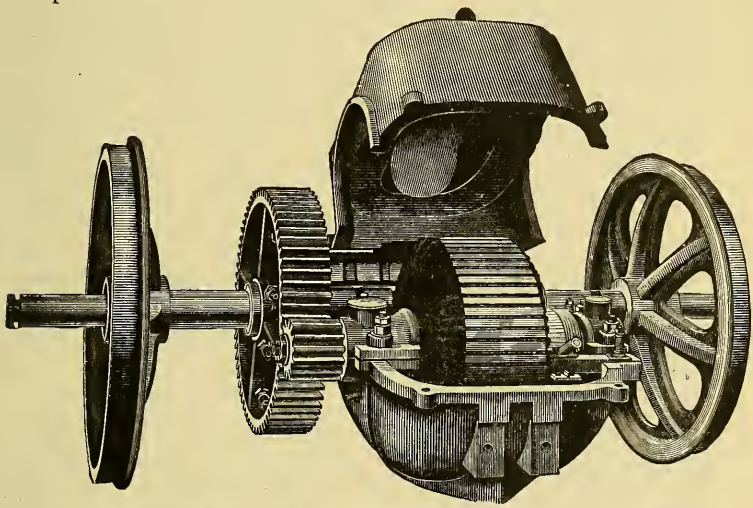


Fig. 136. — Moteur de tramway électrique, type Thomson-Houston.

Mais enfin, l'élan est donné. Il est bien acquis que l'emploi de l'énergie électrique, très économiquement produite dans de puissantes usines génératrices, permet de diminuer notablement le prix de la traction ; il est non moins bien reconnu que la substitution de l'électricité à la traction animale se traduit régulièrement par un accroissement de trafic considérable, bien justifié par l'abaissement du prix de transport, l'augmentation de la vitesse, etc. Et si certaines entreprises de traction électrique se débattent aujourd'hui dans de passagères difficultés, quoi d'étonnant avec les tarifs exagérément bas que, se basant sur les avantages mêmes de ce mode de traction, on s'est cru en droit d'exiger en faveur du public. Certes on ne voulait pas tuer la poule aux œufs d'or, mais à prétendre lui *en* faire pondre de trop gros, on n'a pas assez considéré qu'on risquait tout au moins de la... fatiguer.

Nous n'avons pas l'intention d'entrer ici, plus que nous ne l'avons fait pour les autres applications rencontrées jusqu'ici, dans les détails des procédés de traction. Il nous faut pourtant bien dire que le plus souvent l'énergie électrique fabriquée à l'usine génératrice est amenée à chaque véhicule à l'aide d'un fil aérien où va la chercher un appareil de contact mobile, le *trolley* (*fig.* 137). C'est ainsi que procède la Compagnie Thomson-Houston sur un ensemble de réseaux qui représente quelque chose comme la moitié des voies de traction électrique existant sur le globe.

Quant à la seconde partie du circuit nécessaire à la circulation du courant, ce sont les rails qui la constituent, d'où l'expression de *retour par la terre*.

Quelquefois, des considérations esthétiques plus ou moins justifiées font rejeter le fil aérien comme étant *trop laid*, suivant un calembour lamentablement usé. On fait alors arriver l'énergie, par des câbles établis sous la voie, dans des *caniveaux souterrains* nécessairement très coûteux, ou à des *plots* qui ne devraient s'électriser, grâce à un mécanisme spécial, que lorsque la voiture les recouvre — mais qui oublient trop souvent leur devoir au point de lancer de désagréables secousses dans les jambes des passants.

Quelquefois encore on préfère supprimer la ligne et mettre directement sur le tramway la quantité d'énergie suffisante pour un voyage, en l'enfermant dans des *accumulateurs*. Etant donnés les merveilleux accumulateurs dont on dispose aujourd'hui (p. 144), cette séduisante solution, jusqu'à nouvel ordre, est apparemment la moins bonne qu'on puisse choisir.

Sur les chemins de fer, jusqu'à ce jour, la vapeur a tenu bon : c'est évidemment pour l'électricité un adversaire plus redoutable que le cheval d'omnibus. Il ne faut cependant pas désespérer qu'un jour ou l'autre la victoire restera au moteur électrique et que nous pourrons enfin à son aide sortir sensiblement des vitesses de 70 à 80 kilomètres dont nous n'avons pas varié depuis quelques dizaines d'années. Ce résultat désirable paraît possible à réaliser par l'intermédiaire de l'électricité, car la locomotive n'ayant plus à porter avec elle sa lourde provision d'énergie, puisque le conducteur électrique la lui apporterait, pourrait développer une puissance considérablement plus grande, tout en n'étant plus ébranlée par les formidables secousses dues au mouvement alternatif du piston. Déjà, en France, quelques tentatives intéressantes ont été faites dans cet ordre d'idées : prolongement électrique de la ligne d'Orléans dans Paris et vers la banlieue, ligne de Versailles, Métropolitain, chemin de fer du Fayet à Chamonix, etc.

C'est un tout petit commencement.

L'Italie est autrement... dans le train : 3 lignes d'un développement total de 200 km y sont en exploitation (*fig.* 138).

Quant à l'Allemagne, deux de ses plus importantes Maisons d'élec-

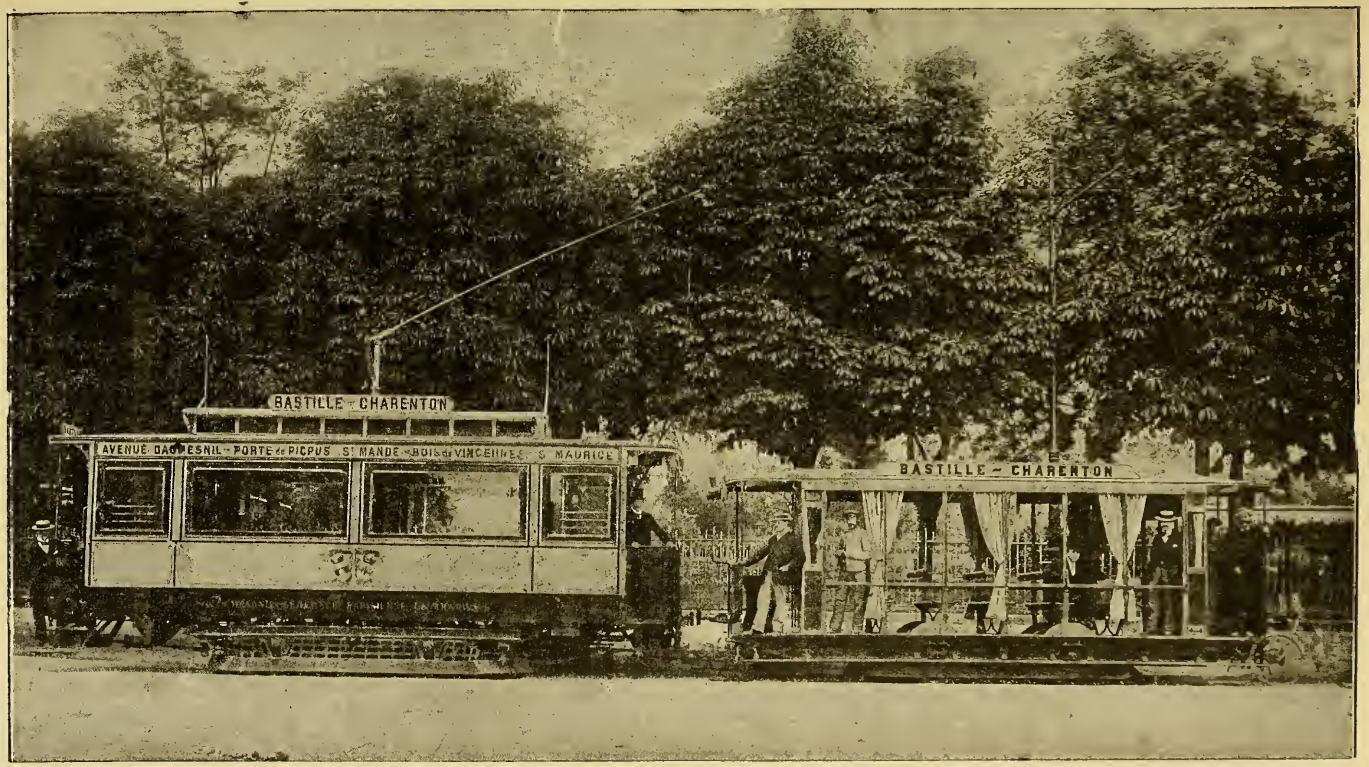


Fig. 137. — Voitures de tramway électrique à trolley. (Système Thomson-Houston.)

tricité, l'*Allgemeine Elektricitats Gesellschaft* et la Maison *Siemens* ont procédé tout dernièrement sur une voie d'expériences à des essais fort intéressants dans lesquels la vitesse a été poussée sans trop de difficultés jusqu'à 230 kilomètres à l'heure! Etant donnée la soif de vitesse qui caractérise notre époque, point n'est besoin d'être prophète pour prévoir, devant de tels résultats, qu'ici encore l'électricité a l'avenir grand ouvert. Ces essais ont été institués en vue de se rendre compte de la possibilité d'établir au départ de Berlin une ligne à très grande vitesse, et, devant leur réussite, il ne semble pas douteux que ce projet sera mis à exécution. Des projets analogues ont été soulevés en ce qui concerne les trajets Anvers-Bruxelles, Londres-Brighton, Manchester-Liverpool, etc.

On voit que l'étranger travaille sérieusement à enlever à nos chemins de fer le record de la vitesse — et que nos compagnies auraient tout à fait tort de s'endormir sur des lauriers quelque peu défraîchis.

La traction électrique a encore une autre corde à son arc : c'est l'automobilisme.

Évidemment, l'automobile électrique n'est pas encore le rêve : il est affligé d'une grosse infirmité, la batterie d'accumulateurs, qu'il lui faut remorquer à travers les cahots de la route et qui ne peut sans inquiétude perdre de vue la cheminée de l'usine de charge Perdre de vue n'est d'ailleurs qu'une façon de parler, puisque, dans un remarquable essai, M. Krieger a pu franchir d'une seule traite et sans recharge le ruban de 305 kilomètres qui sépare Paris de Sainte-Maure, sur la route de Châtellerault ! Mais ce tour de force n'est pas à la portée de tout le monde.

Combien grande est pourtant la supériorité de la voiture électrique sur la voiture à pétrole, qui, si elle envoie superbement au nez du passant sa bouffée odorante, réserve pour ses voyageurs des trépidations plutôt désagréables au taux de quelques centaines à la minute! Combien délicieux en comparaison le silencieux glissement de l'automobile électrique ; et combien on comprend la puissante association qui a nom *Touring-Club de France* de vouloir rompre le fil qui tient en laisse l'*accumobile* — tel le hanneton des écoliers — en provoquant entre nos directeurs de stations centrales une entente qui ouvrira toutes grandes les routes de France!

TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE A DISTANCE

Utilisation de la « houille blanche ». — Grâce aux moteurs électriques, on a encore pu réaliser un problème d'ordre bien différent.

Fig. 138. — Train électrique à grande vitesse. Ligne de milan-Gallarate. (Système Thomson-Houston.)

Nous avons déjà vu que l'électrochimie avait permis de tirer un parti précieux de la puissance de certaines chutes d'eau en lui faisant produire de l'énergie électrique immédiatement utilisable. Mais il faut pour cela que ces chutes soient bien situées, de manière que l'alimentation en matières premières et l'expédition des produits fabriqués ne soient pas trop onéreuses.

S'il n'en est pas ainsi — et c'est souvent le cas — si la chute est dans une région à peu près inaccessible, l'énergie qu'elle développe est-elle donc à tout jamais perdue pour l'industrie? Non, et nous allons voir pourquoi.

D'autre part, une chute peut être très bien placée, avoir tout ce qu'il faut pour séduire un électrochimiste en quête d'un endroit propice pour y placer ses cuves; mais il existe à quelques lieues de là un centre industriel important dans lequel cette énergie serait accueillie d'enthousiasme si on pouvait l'y transporter, et acquerrait une valeur qu'elle serait bien loin d'avoir au pied de la chute : ce serait donc là une solution préférable.

On est ainsi amené à se demander si l'on ne pourrait pas transporter cette énergie d'une chute en un lieu assez éloigné, mais où elle serait mieux appréciée, plus aisément utilisable.

Il n'y a évidemment que l'électricité qui puisse donner la solution du problème.

Je n'ai d'ailleurs aucun doute que vous ne sachiez parfaitement comment vous vous y prendriez, le cas échéant, pour résoudre la question :

Evidemment, vous établiriez une canalisation électrique entre la chute et le lieu d'utilisation, vous transformeriez l'énergie de la chute, par des turbines et des dynamos, en énergie électrique et vous enverriez celle-ci, par l'intermédiaire de votre ligne, jusqu'aux appareils d'utilisation, moteurs ou lampes, suivant les cas.

Ce n'est pas plus sorcier que cela, en effet. Il y a pourtant une petite difficulté. Comme la ligne serait très longue, elle présenterait nécessairement une très grande résistance, car vous n'auriez évidemment pu, au prix où est le... cuivre et même l'aluminium, lui donner une section assez grande pour compenser son énorme longueur.

Il se perdrait alors dans votre ligne une partie de l'énergie peut-être très considérable, et il pourrait même se faire qu'il n'arrive à peu près rien au bout — ce qui serait de nature à réduire à zéro votre prestige d'ingénieur.

Comment s'y prendre pour éviter ce fâcheux résultat ?

Tout simplement employer une *f. é. m. élevée*. En opérant ainsi, nous arriverons à transmettre par un fil conducteur pas trop gros une grande puissance sans trop de perte, parce que la perte en route est RI^2 (p. 60) si R est la résistance de la ligne, et diminue par conséquent très vite à mesure que, pour transmettre une puissance donnée, nous employons une tension plus élevée, donc un moindre courant.

C'est pourquoi les transmissions d'énergie à grande distance se font généralement sous une tension de plusieurs milliers de volts; seulement cette tension est très dangereuse ponr la vie humaine. Sous peine d'*électrocuter* les clients, on ne peut pas leur envoyer directement le courant transmis. Il faut commencer, dans la *sous-station* où arrive le courant, par le *transformer* en courant de basse tension. Pour cela, dans le cas du courant continu, on reçoit le courant de haute tension, ou courant *primaire*, dans de puissants moteurs qui commandent directement des dynamos à basse tension. De celles-ci, le courant produit, ou courant *secondaire*, cette fois inoffensif et prêt à être utilisé, est envoyé à la canalisation qu'il s'agit d'alimenter.

Quand nous parlerons du *courant alternatif*, nous verrons que cette transformation s'effectue bien plus facilement par son emploi, de sorte que c'est généralement à lui qu'on a recours pour les transmissions d'énergie. Il n'empêche que nous devions signaler ici cet ordre d'applications comme un nouvel exemple des services que peut nous rendre le moteur électrique.

Remarquons, pendant que nous y sommes, que cette considération de l'élévation de la diff. de pot. avec la distance à parcourir se retrouve dans toutes les branches de l'industrie électrique. Dans chaque cas particulier, on emploie une diff. de pot. suffisante pour que, tout en donnant à la canalisation une section assez faible, par raison d'économie, on n'y perde pas néanmoins une proportion trop grande de l'énergie qui y circule.

S'agit-il de transporter un peu d'énergie à travers un appartement, quelques volts suffisent. Si l'on doit distribuer dans un rayon de quelques centaines de mètres, cas des réseaux de distribution urbains, on porte la diff. de pot. agissante à 100 ou 200 volts. Un réseau de tramways, dont le développement atteint quelques kilomètres, fonctionne en général sous 5 à 600 volts ; enfin, on canalise l'énergie sous 25.000 volts et plus quand il s'agit d'amener plusieurs milliers de chevaux à quelques centaines de kilomètres.

LABOURAGE ÉLECTRIQUE

Ses qualités de rapidité et d'économie. - Le développement extraordinaire acquis par la traction électrique dans le cours de ces dernières années démontre éloquemment combien l'énergie développée par le moteur électrique est moins coûteuse que celle fourni: — à grand renfort, trop souvent, de ces coups de fouet, de ces trai tements barbares qui nous soulèvent le cœur — par l'infortu.: « moteur à avoine ».

Pourtant les conditions, ici, ne sont pas aussi favorables qu'elles pourraient l'être dans d'autres circonstances : Si une telle supériorité économique est obtenue dans les villes, où l'énergie électrique doit être en général fabriquée dans des stations centrales coûteuses, aux

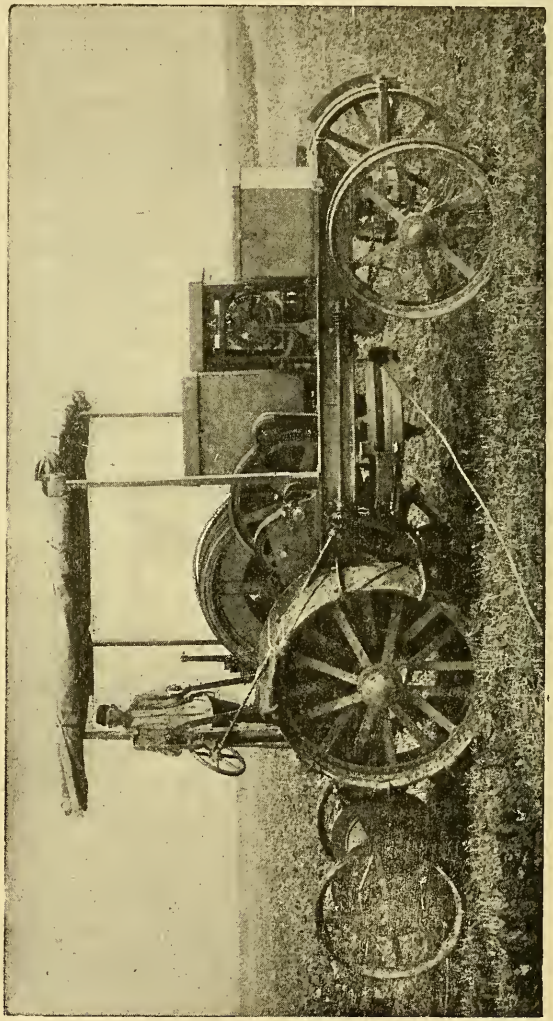


Fig. 139. — Installation de labourage électrique.

dépens d'un combustible dont la hausse continuelle commence à devenir inquiétante, que dire des cas où l'énergie peut être produite presque pour rien par l'utilisation de ces chutes puissantes comme il s'en rencontre tant dans notre beau pays de France? N'est-il pas évident que, lorsque ces conditions peuvent être réalisées, pas un cheval, pas un bœuf ne devraient se voir à 20, à 50 kilomètres à la

ronde, puisque *tout* ce qu'ils peuvent faire, nous pouvons le demander au moteur électrique, et dans des conditions économiques infiniment meilleures.

Que ne gagnerait-on, par exemple, dans tous ces cas et même dans d'autres moins favorables, par la substitution du *labourage électrique* à l'antique labourage par bœufs ou par chevaux?

La question a fait quelques progrès depuis les premiers essais effectués à Sermaize en 1879, par MM. Félix et Chrétien ; elle a été examinée sous toutes ses faces; elle présente des avantages considérables à tous les points de vue. Sans compter qu'avec le labourage électrique on ne risquerait pas de... mettre la charrue avant les bœufs, il faut dire que le moteur électrique s'adapte dès maintenant d'une manière parfaite à cette application, pour laquelle un matériel spécial a été combiné; la rapidité du travail est bien plus grande, le labourage plus profond; enfin, quand l'énergie est produite à l'aide d'une chute d'eau, le prix du défoncement à l'hectare, dans les terres fortes, s'abaisse de 60 francs, prix correspondant aux procédés actuels, à 25 francs!

LES COMPTEURS ÉLECTRIQUES

Tarification de l'énergie à forfait ou au compteur. — Après bien des tergiversations, l'électricité est entrée dans nos mœurs.

Il n'est plus beaucoup de villes où on ne puisse se la procurer à un bon marché relatif, grâce aux stations centrales qui la distribuent à domicile, à l'aide d'une canalisation généralement constituée par des câbles souterrains dans les grandes villes, par des câbles aériens en fil de cuivre posés sur des isolateurs dans les centres moins importants.

Après avoir produit l'énergie électrique, nous savons comment, la station centrale doit résoudre un autre problème : vendre cette énergie... le plus cher possible et se la faire payer.

Quand l'énergie ne coûte pas cher, est empruntée par exemple à l'eau d'une chute, on n'y regarde pas de très près et on fait payer à l'abonné, *à forfait*, une certaine somme annuelle par lampe installée; moyennant quoi l'abonné peut user et abuser de sa lampe, par exemple la laisser brûler pendant 24 heures, quitte, s'il ne craint pas de l'user inutilement, à la mettre sous cloche pendant son sommeil [1]; ceci est rationnel, l'eau de la chute coulant toujours avec la même abondance, que les lampes brûlent ou non.

---

1. Pour le remarquer en passant, cette « mise sous cloche » nécessite certaines précautions, parce qu'elle tend à accumuler la chaleur dégagée par la lampe : ainsi, en enveloppant celle-ci entièrement à l'aide d'un chiffon de drap, on court des risques sérieux pour provoquer un incendie.

Mais, quand l'énergie est coûteuse — et c'est malheureusement le cas général — les choses ne se passent pas de même; il faut mesurer exactement l'énergie dépensée par chaque abonné et le faire payer en conséquence. On est alors conduit à placer sur la dérivation de la canalisation principale qui alimente l'abonné un *compteur* — sa bête noire — qui enregistre la quantité d'énergie électrique consommée, exactement comme un compteur à gaz compte la quantité de gaz.

Ceux de nos lecteurs qui sont abonnés de stations centrales et qui ont l'occasion, à la fin de chaque mois, de faire une grimace expressive à la présentation, de la note à payer, ne seront sans doute pas fâchés de se rendre compte de la façon dont peuvent marcher de semblables appareils.

Il faut dire tout d'abord que les principes sur lesquels on peut établir un compteur sont fort nombreux; mais les compteurs les plus répandus en pratique (Thomson, O'Keenan, etc.), ont comme caractéristique l'emploi de petits moteurs appropriés : c'est ce qui nous a fait remettre jusqu'ici l'étude de ces appareils.

Compteur O'Keenan. — Nous choisirons, à titre d'exemple, un type remarquable par sa simplicité, susceptible d'excellents résul-

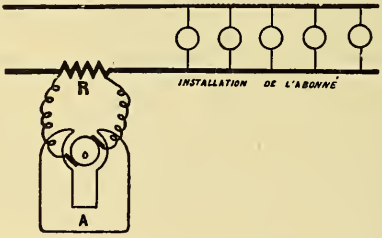


Fig. 140. — Principe du compteur O'Keenan.

tats et très peu coûteux — ce qui a son importance pour l abonné, qui paie en général une location en rapport avec le prix du compteur.

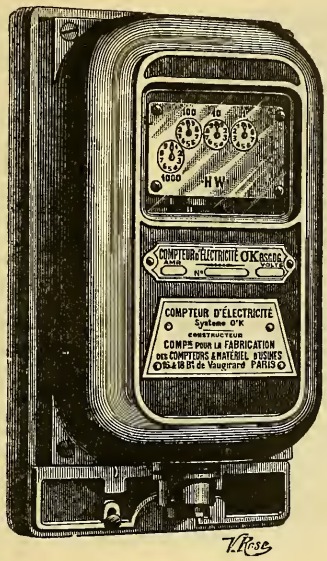
Cet appareil (*fig.* 140) est constitué par un petit moteur, branché en dérivation sur une résistance *R* intercalée dans le circuit principal de l'abonné, et dont l'axe commande un ensemble de roues dentées correspondant aux différents cadrans enregistreurs : un point, c'est tout.

Voyons le fonctionnement.

Le moteur est *magnéto* (Voir p. 199), c'est-à-dire que son champ, produit par un aimant A, est *constant.*

Son induit est soumis à chaque instant à la diff. de pot. *RI* qui existe aux bornes de la résistance auxiliaire *R* sous l'effet du courant

consommé I[1], de sorte que le moteur tourne dès que l'abonné consomme. Pendant cette rotation il effectue un travail nul, ou plutôt un travail négligeable qui correspond au frottement et à l'entraînement des aiguilles du cadran ; en appelant à notre secours les principes rencontrés tout à l'heure (p. 225) au cours de l'étude des moteurs électriques, nous voyons que, dans ces conditions, il tourne à une vitesse suffisante pour développer une force contre-électromotrice E' juste égale et opposée à la diff. de pot. RI qui lui est appliquée. Or, le champ inducteur dans lequel il tourne étant constant — nous



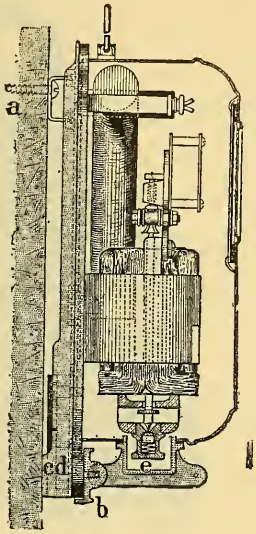


Fig. 141 et 142. — Compteur O'Keenan.

l'avons vu — cette *f. c. é. m.* varie dans le même rapport que la vitesse, doublant en même temps qu'elle ou inversement. Si donc la diff. de pot. appliquée RI double, c'est-à-dire si le courant consommé double — puisque R est constant — le moteur tournera deux fois plus vite pour mettre sa *f. c. é. m.* « à la hauteur » ; si, au contraire, le courant consommé, et par suite RI, tombe au quart, la vitesse tombera aussi au quart, etc.

En d'autres termes, la vitesse du moteur dépend à chaque instant de l'intensité consommée par le client, de même que la vitesse de

1. La puissance RI^2 absorbée par cette résistance étant perdue, on fait R aussi petit que possible, et le RI correspondant n'est à pleine charge que de 0,5 volt au plus, ce qui est suffisant pour le moteur du compteur, petite merveille de sensibilité qui démarre avec moins de 0,01 volt.

rotation d'un compteur à gaz dépend de la rapidité du débit; dès lors le nombre de tours du moteur en un temps donné, enregistré par les cadrans, dépend de la *quantité totale d'électricité* qui a passé dans le circuit pendant ce temps, comme le nombre de tours enregistré par un compteur à gaz dépend de la quantité de gaz qui l'a traversé.

Le compteur O'Keenan mesure donc la quantité d'électricité consommée et doit régulièrement être gradué en *ampères-heures*.

C'est un *ampère-heure-mètre*.

Mais, si vous avez bien compris la différence qui existe entre

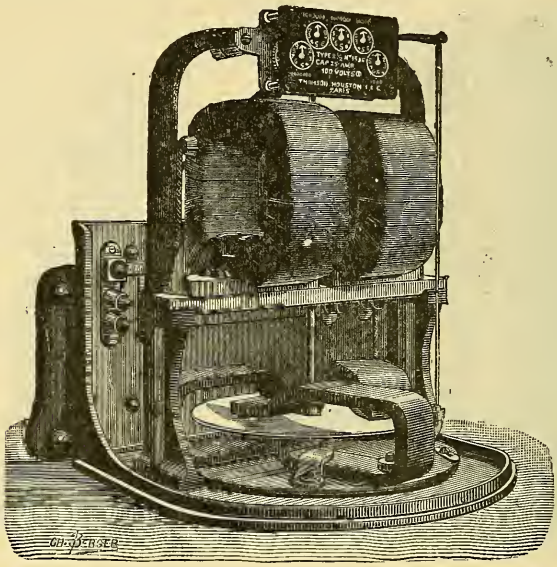


Fig. 143. — Compteur Thomson

quantité d'*électricité* et quantité d'*énergie électrique* (Voir p. 132), vous ne manquerez pas de remarquer que ce qui est intéressant, c'est de connaître non pas les ampères-heures, mais bien les *watts-heures* dépensés par l'abonné. C'est vrai ; seulement il est aisé de déduire l'un de l'autre, puisque nos stations distribuent à *potentiel constant* 100 ou 200 volts, par exemple. Car un courant de 1 ampère débité sous une pression de 100 volts correspond à 100 watts et, par suite, sous ce voltage, une quantité d'électricité de 1 ampère-heure correspond à une quantité d'énergie de 100 watts-heures ou 1 hectowatt-heure. Donc, si la distribution est à 110 volts, on aura les watts-heures dépensés en multipliant par 110 les ampères-heures indiqués par le compteur O'Keenan.

D'autres compteurs, tel le compteur Thomson (*fig.* 143), mesurent directement l'énergie consommée : ce sont des *watts-heures-mètres*.

Pendant longtemps, les compteurs électriques ont été des instruments fort inexacts et avaient alors tout ce qu'il fallait pour entretenir la mauvaise humeur des abonnés grincheux; mais, grâce aux perfectionnements que le développement de l'électricité a rendus nécessaires, on est arrivé à en faire des instruments aussi exacts que le compteur à gaz.

COURANTS VARIABLES

CHAPITRE DIX-HUITIÈME

SELF-INDUCTION

En examinant de plus près que nous ne l'avons fait jusqu'ici le mécanisme de la production du courant dans un conducteur, nous allons y découvrir certaines particularités fort intéressantes, qui vont nous mettre sur la voie de nouveaux phénomènes.

Faisons un nouvel appel (*fig.* 144) à une vieille connaissance depuis longtemps délaissée, notre système de vases communiquants A et B, et ouvrons le robinet commandant le tuyau qui les réunit. Vous savez très bien que l'écoulement de l'eau, surtout si le tuyau est gros et long, ne prend pas instantanément sa valeur normale parce que ce liquide présente une certaine *inertie*. Comme au train qui démarre, comme à la machine qui se met en route, il lui faut un certain temps pour vaincre cette inertie et acquérir sa vitesse normale, définie par la différence de niveau agissante et les dimensions du tuyau.

Ainsi donc, l'écoulement normal dans un tuyau est précédé d'une *période variable* pendant laquelle le courant, d'abord nul, augmente constamment.

En électricité, il se passe quelque chose d'exactement analogue au moment où un courant s'établit dans un conducteur. Un conducteur électrique, *outre sa résistance*, oppose toujours au passage du courant une certaine *inertie*. Disons tout

de suite — quitte à le justifier tout à l'heure — que cette inertie spéciale s'appelle la *self-induction*. Aussi, lorsque le conducteur est fermé sur une diff. de pot. constante (*fig.* 145), le courant ne prend pas d'un seul coup son régime normal, celui qui est défini par la loi de Ohm ; il commence par être très

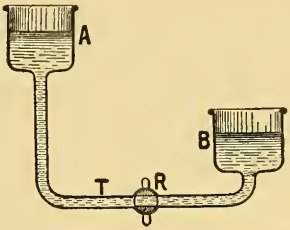


Fig. 144. — Par suite de l'*inertie*, le liquide met un certain temps à se mettre en mouvement lorsqu'on ouvre R.

faible, et, comme le courant d'eau, augmente petit àpetit pour atteindre sa valeur de régime. Quand je dis petit à petit, entendons-nous, car, dans les conducteurs présentant le plus possible de cette *inertie* spéciale, le plus possible de self-induction, le courant a sensiblement pris en quelques secondes sa valeur normale.

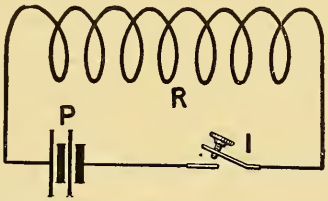


Fig. 145. — Par suite de l'inertie magnétique ou self-induction, le courant met un certain temps à prendre son régime lorsqu'on ferme I.

Ainsi, dans un conducteur quelconque, le *régime permanent* défini par la loi de Ohm est précédé d'un *régime variable* dans lequel le courant se rapproche graduellement de la valeur normale.

Cherchons à comprendre le mécanisme de ce phénomène.

Vous savez qu'un corps en *mouvement* diffère d'un corps *au repos*, en particulier parce qu'il renferme une certaine *force vive*, une certaine énergie mécanique, qui se manifeste par

des effets dont le corps en mouvement est susceptible : les conséquences si terribles de la rencontre de deux trains ou de deux navires, les effets des balles ou des boulets ne sont autre chose que des manifestations de cette énergie.

Or, lorsque le liquide de notre tuyau a pu s'écouler par suite de l'ouverture du robinet R, il a passé du repos au mouvement. Il a fallu, d'après ce qui précède, qu'il absorbe sous forme de force vive une certaine énergie ; mais de l'énergie ne se crée pas, nous le savons, et, si le liquide qui s'écoule en absorbe, c'est qu'il la prend quelque part. Où ? Ce n'est pas aux dépens du liquide resté dans A, puisque ce liquide est toujours au même niveau et possède toujours, par suite, la même quantité d'énergie disponible. Cela ne peut donc être qu'à ses propres dépens, aux dépens de l'énergie qu'il détenait de par son niveau primitif, qu'on lui a fourni en l'élevant, qu'il restitue en s'abaissant.

Comme cette énergie *potentielle* renfermée par le liquide est restreinte, il faut qu'une certaine quantité s'en écoule avant que toute la force vive soit acquise ; pendant toute cette période d'emprunt, le liquide ne possède donc qu'une vitesse réduite, qui s'augmente constamment. La vitesse commence ainsi par être très faible, pour se rapprocher graduellement de la vitesse normale.

Tel est, pour les liquides, le mécanisme de la période variable.

Pour le conducteur électrique, les choses se passent de la même façon :

Un conducteur électrique traversé par un courant diffère d'un conducteur inerte en ce que l'espace qui l'entoure est dans un état particulier que nous avons dénommé *champ magnétique* (Voir p. 161).

Pour *créer* ce champ magnétique, il faut absorber une certaine quantité d'énergie électrique : c'est l'équivalent de l'énergie absorbée sous forme de quantité de mouvement par l'eau qui coule dans un tuyau ; une fois créé, le champ persiste autant que le courant, *sans exiger de nouvelle dépense d'énergie*, pas plus que n'en exige la conservation du champ magnétique d'un aimant permanent. Donc, s'il y a absorption d'énergie, cette absorption se limite tout entière au moment

où le champ est créé, c'est-à-dire au moment où le courant commence à circuler. Il est donc tout naturel qu'ici, comme dans le cas du courant d'eau, le courant électrique ne prenne pas tout à coup sa valeur normale, mais l'atteigne progressivement.

Nous voici donc bien fixés :

Si, lors de la fermeture du circuit, le courant ne prend pas tout d'un coup sa valeur normale, c'est qu'il y a absorption, *emmagasinement*, sous une forme spéciale, d'une certaine quantité d'énergie électrique empruntée à la source.

Cet emmagasinement, bien qu'il n'ait pas l'air de tirer à conséquence, nous donnera, tout à l'heure, la clef de quelques phénomènes importants.

Il nous permet dès à présent, ce qui est très intéressant, de donner un nouveau croc-en-jambe à la loi de Ohm, qui, grâce à lui, ne peut plus s'appliquer à aucun circuit que dans des conditions spéciales. En effet, l'*emmagasinement* d'énergie sous forme de champ magnétique, est tout autre chose que la *dépense* de cette énergie sous forme de chaleur : il y a production, dans cette période variable, d'un phénomène extérieur, de sorte que l'intensité du courant est alors représentée, non par la loi de Ohm, mais par une relation compliquée qui dépend à la fois de la résistance du conducteur, de son *coefficient de self-induction* et du temps écoulé depuis la fermeture du circuit.

Ce n'est qu'après cette période d'emmagasinement que l'énergie envoyée par la source ne sert plus à rien d'autre qu'à l'échauffement du conducteur, et que la loi de Ohm devient applicable au circuit [1]. Et alors, le régime permanent une fois atteint, le débit est exactement *le même* que si la self-induction *n'existait pas*.

Lorsqu'il ne s'agit que d'un conducteur rectiligne, le champ qui l'entoure est très faible ainsi que l'accumulation d'énergie.

On obtient un champ beaucoup plus intense, comme nous

---

1. A condition, bien entendu, qu'il n'y ait ni moteur ni cuve électrolytique dans ce circuit.

le savons, et par conséquent un emmagasinement plus grand, lorsque le conducteur est enroulé sous forme de bobine.

Enfin, les effets sont portés à leur maximum, la self-induction devient très grande quand, dans la bobine, on introduit un *noyau de fer*, parce qu'on diminue alors la résistance magnétique (Voir p. 160).

Dans ces conditions, l'emmagasinement devient si grand qu'on peut mettre en évidence la période variable en intercalant dans le circuit de la bobine (*fig.* 146) un ampèremètre *apériodique* (à indications rapides). Lorsqu'on ferme le circuit, on voit l'aiguille arriver *lentement* à sa position d'équilibre. Si, au contraire, on enlève le noyau de fer, on rend presque nulle la self-induction, et, à l'établissement du cou-

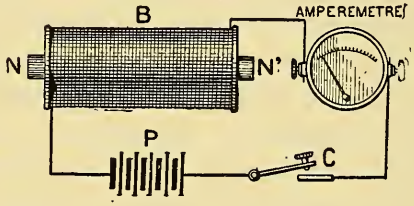


Fig. 146. — Mise en évidence de la période variable.

rant, l'aiguille de l'ampèremètre arrive *brusquement* à sa position d'équilibre.

Mais le propre d'un emmagasinement, c'est d'être restitué à un moment quelconque.

Que devient l'énergie emmagasinée autour de notre conducteur pendant la période variable, au moment où nous interrompons le courant?

Pour répondre à cette question, nous allons nous adresser à notre tuyau contenant de l'eau en mouvement, et un phénomène bien connu, celui du *coup de bélier*, va nous donner la réponse.

Interrompons tout d'un coup le courant liquide en fermant vivement le robinet (*fig.* 147). Le mouvement étant brusquement arrêté, la force vive, qui n'avait d'autre raison d'être que ce mouvement, devient brusquement disponible : il faut à toute force qu'elle se dépense.

Aussi, si la différence de niveau est grande, le courant d'eau très rapide, il se produit contre les parois du tuyau une réaction violente, un choc énergique que l'on entend parfaitement et dans lequel se dépense l'énergie libérée.

C'est le coup de bélier.

Imaginons maintenant que, avant le robinet R (*fig.* 147), nous ayons placé un tube *t* ouvert à son extrémité. Au moment où nous fermerons le robinet, l'eau n'aura plus à dépenser son énergie en cherchant à distendre les parois de T, puisqu'elle trouvera dans *t* un chemin plus facile. Aussi, hors de la fermeture, un jet d'eau s'élancera-t-il de *t* pour jaillir à un niveau *bien supérieur* à celui du liquide dans A.

Conclusion, utilisée par Montgolfier dans son *bélier hydrau-*

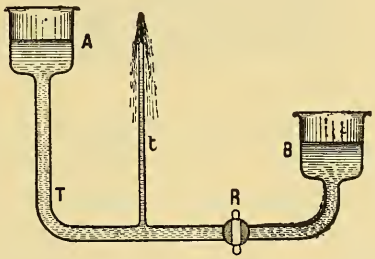


Fig. 147. — Coup de bélier.

lique, le coup de bélier produit par un courant liquide peut engendrer des différences de niveau *beaucoup plus grandes* que celle même qui a donné naissance au courant.

Lorsque nous ouvrons un circuit électrique présentant une grande self-induction et traversé par un courant intense, nous constatons la production au point de rupture d'une forte étincelle, l'étincelle de rupture ou d'*extra-courant*. Eh bien ! cette étincelle correspond précisément au coup de bélier ; le champ produit par le conducteur a brusquement disparu ; l'énergie qu'il détenait est devenue tout d'un coup disponible : par suite de cette disparition du champ, il y a eu dans le conducteur une *variation de flux*, qui a induit une force électromotrice. Comme cette variation a été très rapide, la f. é. m. induite a été elle-même très élevée, *beaucoup plus élevée* que celle de la source — de même que la différence de niveau

engendrée par le coup de bélier — et de cette f. é. m. élevée est résultée une étincelle violente.

Si la self-induction est grande et le courant intense, l'énergie emmagasinée devient considérable et les f. é. m. de self-induction provoquées à la rupture peuvent devenir fort dangereuses. Ainsi, si on coupait brusquement en pleine marche le circuit des inducteurs d'une puissante dynamo, on pourrait provoquer des tensions suffisantes pour percer l'isolant.

Expérimentalement, il est facile de voir l'influence de la self-induction sur la force des étincelles de rupture à l'aide du même appareil (*fig.* 146) qui nous a permis tout à l'heure de constater *de visu* l'existence de la période variable. Que le noyau soit enfoncé ou non, l'ampèremètre nous indique toujours le même courant *permanent*, 5 ampères par exemple; mais, dans le premier cas, la self-induction étant très forte, les étincelles à la rupture sont incomparablement plus fortes que lorsque le noyau est retiré.

D'après ce que nous avons vu, c'est à l'induction du circuit *sur lui-même* qu'est due l'étincelle de rupture. De même, électriquement parlant, le retard à l'établissement du courant provenait de ce que le flux embrassé par le circuit, passant de zéro à une certaine valeur, induisait dans le circuit, pendant cette période variable, une force électromotrice *opposée* à la f. é. m. de la source, une force contre-électromotrice de *self-induction* comme on dit. Mais si cette f. é. m., provenant d'une *augmentation* de flux, était opposée au courant (loi de Lenz, p. 189), — de même que la f. c. é. m. d'une cuve électrolytique ou d'un moteur — la f. é. m. développée à la rupture, provenant d'une *diminution* de flux, est opposée à la première, de sorte que l'extra-courant est de *même sens* que le courant normal.

Une expérience fort élégante, imaginée par M. Fleming, met bien en évidence les curieuses propriétés de la self-induction

Alimentons par une batterie d'accumulateurs un électro-aimant à gros fil shunté par une lampe à incandescence, choisie de façon à n'être portée qu'au rouge sombre par la faible diff. de pot. qui existe à ses bornes, une fois le régime permanent établi (*fig.* 148).

En rompant brusquement le circuit des accumulateurs par un interrupteur I, on voit la lampe briller pendant un instant d'un vif éclat. Au moment de la rupture, en effet, l'énergie mise en liberté par la disparition du champ a à sa disposition deux chemins pour se dépenser : l'espace d'air peu conducteur qui sépare les deux parties de l'interrupteur, et le circuit fourni par la lampe.

Elle choisit évidemment de ces deux chemins le moins résistant, c'est-à-dire que, dans ces nouvelles conditions, l'étincelle de rupture est à peu près supprimée et que toute l'énergie mise en jeu vient se dissiper en un temps très court dans la lampe. Donc, puissance instantanée très grande, qui porte au rouge blanc le filament.

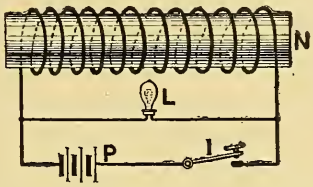


Fig. 148. — Expérience de Fleming sur la self-induction.

Nous retrouvons ici quelque chose que nous savions déjà, à savoir, que les tensions développées pendant un instant très court par la self-induction sont *bien plus grandes* que celles produites par la source elle-même.

Suppression des étincelles à la rupture. — Nous apprenons, de plus, qu'un moyen de supprimer les étincelles de rupture, parfois si gênantes, consiste à shunter la self du circuit par une résistance assez grande pour ne pas réclamer un débit supplémentaire trop grand.

Un meilleur moyen, parce qu'il ne réclame à la source aucun débit supplémentaire, consiste à shunter l'interrupteur lui-même par une résistance assez grande, dans laquelle passe l'extra-courant et que l'on retire elle-même après la rupture.

En résumé, les phénomènes que nous venons d'examiner sont dus à l'induction d'un circuit sur lui-même; le nom de

self-induction est donc bien justifié, le mot « self » signifiant en anglais *soi-même ;* mais le mot *auto-induction* le serait tout autant, si l'une de nos manies n'était d'aller chercher si loin des expressions que notre langue est toute disposée à nous fournir.

Il est évident que la quantité d'énergie emmagasinée pour créer le champ magnétique d'une bobine de self dépend de la *grandeur* de la self-induction correspondante. Si la self-induction est grande, la quantité emmagasinée sera grande; si elle est faible, il en sera de même de la quantité d'énergie emmagasinée. Mais ces expressions : *grande* self-induction, *faible* self-induction, sont très vagues, et l'on ne peut s'en contenter. Aussi, comme pour les autres grandeurs d'électricité, on a créé pour la self-induction une unité spéciale, l'**henry**, du nom d'un physicien américain.

Représentons par L la self-induction d'une bobine exprimée en henrys. On démontre que la quantité totale d'énergie emmagasinée par un courant de I ampères traversant cette bobine en régime permanent est en watts-secondes ou *joules :*

$$W = \frac{1}{2} LI^2;$$

le joule est égal à 0,1 kilogrammètre environ. Si donc nous avons une bobine de 10 henrys traversée par un courant de 10 ampères, nous obtiendrons :

$$W = \frac{1}{2} \times 10 \times 100 = 500 \text{ joules} = 50 \text{ kilogrammètres.}$$

Supposons que la rupture se fasse assez brusquement pour que l'étincelle dure seulement 0,1 seconde : les 50 kilogrammètres étant dépensés en 0,1 seconde correspondront à une *puissance* de $50 \times 10 = 500$ kilogrammètres *par seconde*, soit près de 7 *chevaux* qui seront mis en jeu dans cette étincelle; or, si la résistance ohmique du circuit est, mettons de 2 ohms, la force électromotrice nécessaire pour produire le débit de 10 ampères est de 20 volts seulement et

la puissance du générateur n'est par conséquent pas supérieure à $20 \times 10 = 200$ watts, soit *un quart de cheval* environ.

On s'explique, par ces chiffres, les effets destructifs qui peuvent résulter de ces phénomènes d'extra-courant.

RÉSUMÉ

Lorsqu'on soumet un circuit à l'action d'une diff. de pot., le régime normal du courant ne s'établit pas immédiatement et est précédé d'une période de *régime variable* pendant laquelle le courant arrive petit à petit à la valeur définie par la loi de Ohm. Ce phénomène est dû à l'absorption d'énergie entraînée par la création du champ magnétique qui entoure les conducteurs traversés par le courant, énergie qui redevient libre à la rupture du circuit et se manifeste alors par une étincelle d'*extra-courant :* les choses se passent comme si le circuit présentait une certaine *inertie*. A cette inertie spéciale on donne le nom de *self-induction*, parce que ces absorptions et ces restitutions d'énergie se font par l'intermédiaire des forces électromotrices d'induction développées par les variations du champ sur le circuit *lui-même:* f. é. m. *opposée* à la diff. de pot. agissante au moment de l'établissement du courant, f. é. m. *de même sens* au moment de sa disparition. Comme la disparition du champ est très brusque lors d'une rupture, il en résulte que la f. é. m. développée peut être beaucoup plus grande que la f. é. m. agissante.

On exalte considérablement la self-induction d'une bobine en la munissant d'un noyau de fer doux, parce que le flux induit est beaucoup plus intense, et correspond à un emmagasinement d'énergie plus grand.

On évalue la self-induction à la grandeur des effets qu'elle produit, et on la mesure en *henrys*.

CHAPITRE DIX-NEUVIÈME

APPLICATIONS DE LA SELF-INDUCTION

Rôle protecteur de la self-induction dans les machines à courant continu; disjoncteurs. — Quand nous parlerons des phénomènes dus au courant alternatif, la considération de la self-induction prendra une importance capitale.

Dans le courant continu, son rôle est plus effacé, car presque tous les phénomènes que l'on y rencontre sont relatifs au régime normal du courant, au régime permanent, dans lequel elle n'a à intervenir d'aucune façon.

Pourtant, nous pouvons citer ici même quelques applications intéressantes de la self-induction.

D'abord, la self-induction des machines à courant continu joue modestement un rôle protecteur qu'il n'est que juste de reconnaître : si cette self-induction était nulle, les courants qui prennent naissance en cas de courts-circuits accidentels sur les circuits alimentés par ces machines prendraient instantanément une valeur énorme, susceptible de détériorer gravement ces machines, surtout dans le cas d'une excitation en série.

Mais la présence de la self-induction empêche le courant d'acquérir instantanément cette valeur : il ne peut croître que relativement lentement, et la machine se trouve alors protégée par le fonctionnement du *disjoncteur automatique* (*fig.* 149), que l'on intercale en général entre la machine et le circuit d'utilisation, ce disjoncteur étant constitué par un électro-aimant qui attire une armature coupant le circuit dès que le courant circulant dans l'électro acquiert une valeur susceptible de compromettre la machine.

Allumoirs. — Puisque la self-induction développe à la rupture d'un circuit à grande self une f. é. m. beaucoup plus élevée que celle de la source, il est tout indiqué dans certaines circonstances de profiter de ce fait : c'est le cas, par exemple, lorsque nous ne disposons

que d'une f. é. m. inférieure à celle qui nous est nécessaire, et que, d'autre part, celle-ci ne doit servir que pendant un instant très court. C'est ce qu'on fait d'assez heureuse façon dans certains *allumoirs* électriques.

Souvent, un allumoir comporte tout simplement un fil fin de pla-

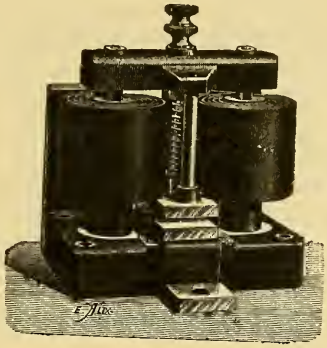


Fig. 149. — Disjoncteur automatique Bréguet.

tine placé au voisinage d'une petite lampe à essence. Lorsqu'on fait passer le courant de quelques éléments de pile dans ce fil en appuyant sur le bouton d'un interrupteur, il rougit et enflamme les vapeurs d'essence. Une batterie de 4 ou 5 éléments Leclanché est suffisante pour alimenter dans une maison autant de ces allumoirs que l'on veut, en même temps que les sonneries et les réveille-ma-

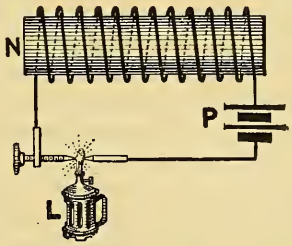


Fig. 150. — Allumoir à self-induction.

tin, à condition, toutefois, que ces éléments soient à faible résistance intérieure et que pour cela les bâtons de zinc traditionnels y soient remplacés par des zincs circulaires. Mais ces allumoirs présentent des inconvénients : le fil est fragile, fond facilement si le courant est d'aventure un peu trop énergique, ne rougit pas du tout, au contraire, si la pile est tant soit peu polarisée.

Aussi leur préfère-t-on souvent les allumoirs à self-induction ou à

extra-courant dans lesquels un circuit à faible résistance et à grande self-induction est constitué (*fig.* 150) par un électro-aimant à noyau de fer droit lamellé.

La fermeture du circuit est effectuée par un interrupteur d'un genre spécial, et la rupture se fait en un point situé en regard d'une lampe à essence.

Par suite de la self-induction considérable du circuit et du courant assez énergique qui l'a traversé, l'étincelle d'extra-courant est suffisante pour mettre le feu aux vapeurs d'essence. Employées directement, les piles auraient été parfaitement incapables de fournir cette étincelle, mais en passant par l'intermédiaire de la self-induction et de l'accumulation d'énergie qu'elle procure, on a créé à leur aide pendant un instant très court, mais suffisant, une force électromotrice élevée, susceptible de produire l'effet désiré.

PARAFOUDRES

Si chétif et si impuissant que l'homme puisse paraître devant cette imposante manifestation de la nature qui s'appelle la foudre, il a le droit de s'enorgueillir en pensant qu'il peut aujourd'hui la braver impunément.

L'admirable invention de Franklin, le *paratonnerre*, en offrant à la décharge atmosphérique un chemin qu'il lui faut suivre bon gré mal gré jusqu'à une nappe liquide souterraine, a transformé ses plus terribles accès de fureur en simples... coups d'épée dans l'eau.

Pourtant il est des cas où la lutte contre la foudre est moins facile, car nous semblons prendre à tâche de l'introduire dans l'intérieur de nos demeures. Ce sont précisément les applications de l'électricité qui nous ont conduit à ces témérités.

Ainsi, les fils télégraphiques qui sillonnent les campagnes, qui y sont sur leur immense développement les témoins de tant d'orages, sont fréquemment frappés par la foudre, et le nombre est grand des poteaux télégraphiques qui portent de ces visites les marques indélébiles. Or la décharge électrique doit nécessairement se propager le long du chemin que lui offre le fil télégraphique et arriver jusqu'aux appareils, où elle foudroiera les employés.

De leur côté, les canalisations aériennes employées dans certaines villes pour la distribution de l'énergie électrique peuvent entraîner des conséquences aussi terribles.

Et cependant, dans un cas comme dans l'autre, il est impossible d'interrompre la continuité métallique, ce qui donnerait bien la sécurité cherchée, mais ce qui, en même temps, supprimerait la raison d'être de ces canalisations.

Il ne serait donc guère agréable d'être employé de télégraphe ou

abonné de secteur électrique si nos ingénieurs n'avaient réussi à disposer entre la canalisation et les locaux dans lesquels elle pénètre un obstacle qui, facilement franchi par le courant d'utilisation, soit insurmontable pour l'électricité atmosphérique.

Cet obstacle s'appelle un *parafoudre*, et la partie capitale de ce parafoudre consiste généralement en une self-induction L, L′, dont le rôle est bien facile à comprendre (*fig.* 151).

La décharge atmosphérique est un phénomène sinon instantané, du moins d'une extrême brièveté. Sous la diff. de pot. énorme qu'elle provoque, un courant tend bien à traverser la self-induction, mais

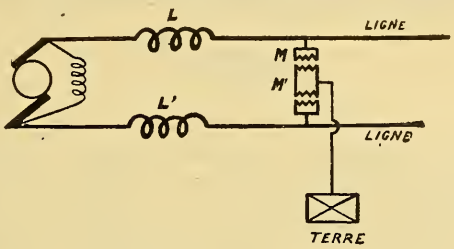


Fig. 151. — Parafoudre.

non seulement ce courant n'arrive pas au régime permanent, ce qui demanderait une notable fraction de seconde; mais encore au moment où la diff. de pot. s'évanouit, il n'a eu le temps d'acquérir qu'une valeur extrêmement faible.

En somme la résistance qu'oppose la self-induction au passage de l'électricité atmosphérique est énorme grâce à la quasi instantanéité du phénomène, et la foudre ne peut aller plus loin. Elle aurait, d'ailleurs, d'autant plus mauvais goût d'insister, que tout près, on a disposé un chemin bien plus facile pour elle, constitué par deux plaques métalliques M, M′ munies de pointes placées en regard, très près l'une de l'autre et communiquant l'une avec la ligne, l'autre avec la terre.

Le courant à utiliser, lui, traverse au contraire très facilement la self-induction, par suite de sa durée prolongée, et ne peut, en raison de sa faible tension, passer par le chemin réservé à la foudre, dont la résistance est pour lui insurmontable.

CHAPITRE VINGTIÈME

INDUCTION MUTUELLE DE DEUX CIRCUITS

Nous allons compliquer un peu la bobine de self-induction que nous manipulions page 254 ; nous y superposerons, sur l'enroulement A qu'elle comportait, un deuxième enroulement B (*fig.* 152) ; celui-ci, lors de l'établissement du courant primaire et lors de sa suppression, va se trouver soumis exactement aux mêmes variations de flux que le *circuit primaire* lui-même. Donc, des f. é. m. d'induction vont prendre naissance dans ce *circuit secondaire*, et des courants induits y circuleront si ce circuit est fermé sur lui-même ou sur une résistance.

Où est prise cette énergie qui apparaît ainsi dans le secondaire? Ce ne peut être évidemment qu'à l'énergie que le primaire amène de la source d'électricité : si on observe la période variable d'établissement du courant dans le primaire, on constate qu'elle se modifie complètement si l'on vient à fermer le secondaire, parce que c'est dans cette période, nous l'avons vu (p. 252), que de l'énergie est transmise au champ, et qu'on doit transmettre, en plus, celle qui se dépense dans le secondaire quand celui-ci est fermé. De même, on constate que l'étincelle d'extra-courant primaire est moindre si le secondaire est fermé, parce que l'énergie libérée par la disparition du champ, au lieu d'être obligée de se dépenser toute dans cette étincelle, peut maintenant se porter en grande partie dans le circuit secondaire.

Ainsi, voilà du nouveau : voilà deux circuits complètement

isolés l'un de l'autre par la soie ou le coton qui recouvre le fil, et qui, pourtant, échangent leur énergie avec la plus grande facilité, grâce au champ magnétique qui forme entre eux un lien intime !

Décidément, il ne nous faut pas prendre au pied de la lettre

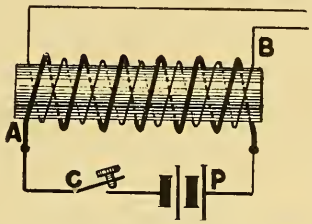


Fig. 152. — Induction mutuelle.

cette expression d'*isolants* que l'on accepte trop souvent au sens absolu du mot. Nous aurons l'occasion de donner plus loin une idée des hypothèses faites à ce sujet par le grand savant anglais Maxwell.

Mais, avant d'aller plus loin, nous allons nous aider d'une représentation hydraulique — assez grossière à la vérité — pour saisir plus aisément certains de ces phénomènes de self-induction et d'*induction mutuelle*.

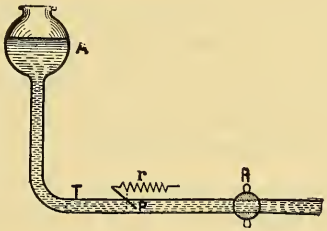


Fig. 153. — Représentation hydraulique de la self-induction.

Voyons d'abord la self-induction.

Continuons à représenter un conducteur à grande self-induction que traverse un courant, par un tuyau T gros et long, possédant une grande inertie, alimenté par un vase A. Mais, de plus, imaginons dans ce tuyau une palette P articulée en son centre O et obstruant en partie la section du tuyau T (*fig.* 153). Cette palette est soumise à l'action d'un ressort *r*

qui, lorsque le robinet R est fermé, est détendu de telle sorte que la palette au repos, comme l'indique la position en pointillé, est exactement perpendiculaire au tuyau.

Lorsqu'on ouvre R, le liquide, se mettant *progressivement* en mouvement par suite de son inertie, entraîne avec lui la palette qui, tendant le ressort, prend une inclinaison graduellement plus grande et arrive finalement à la position indiquée sur la figure, position où la tension du ressort fait exactement équilibre à la pression exercée sur la palette par le liquide en mouvement. La tension plus ou moins grande du ressort, l'inclinaison plus ou moins grande de la palette correspondront pour nous aux différentes valeurs du *champ* produit par notre circuit à self-induction, la palette fortement inclinée correspondant à un champ intense et inversement.

D'où les analogies suivantes :

Au moment de l'ouverture de R, la palette s'incline progressivement jusqu'au moment où le courant liquide atteint son régime : De même, lorsqu'un courant électrique s'établit dans un circuit présentant de la self-induction, il produit *un champ magnétique qui augmente progressivement jusqu'à une certaine limite, atteinte lorsque le courant arrive au régime constant défini par la loi de Ohm.*

Toute variation de débit dans T est évidemment accompagnée d'un changement dans la position de la palette. De même, *toute variation de courant dans un circuit électrique est accompagnée d'une variation du champ produit.*

Faisons varier le courant liquide : la palette commence aussitôt à se déplacer, pour n'arriver à sa nouvelle position que lorsque le courant est redevenu constant. De même, *le temps de la variation d'intensité du champ magnétique est précisément égal à celui de la variation du courant inducteur.*

Fermons R : le ressort se détend et ramène la palette à sa position initiale : *Le champ magnétique disparaît avec le courant qui l'a produit.*

Inversons le sens du courant en plaçant le vase A à l'autre but de T. La palette est entraînée en *sens inverse*, en comprimant *r : lorsque nous inversons le sens du courant électrique, nous devons inverser le sens du champ produit*, ce que cons-

tate aussi l'application de la loi du tire-bouchon de Maxwell (p. 169).

Somme toute, nous ne faisons que retrouver ici les particularités déjà étudiées de la self-induction. Mais, pour l'induction mutuelle, les avantages du même mode de représentation vont devenir plus appréciables et nous donner avec une réelle simplicité des résultats qu'il serait délicat de demander à d'autres raisonnements.

Pour cet ordre de phénomènes, l'adaptation de notre mode de représentation est facile : considérons la figure 154.

Nous y voyons, à côté de notre tuyau de tout à l'heure, T, un autre tuyau T′ rempli d'eau, fermé sur lui-même, qui, vous vous en doutez, va jouer le rôle d'un circuit électrique fermé.

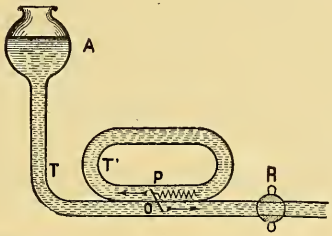


Fig. 154. - Représentation hydraulique de l'induction mutuelle des deux circuits.

La palette à ressort P peut se déplacer dans T′ sous l'influence des courants liquides provoqués en T.

D'après ce qui précède, le tuyau T alimenté par A (*fig.* 154) correspond au circuit inducteur A, alimenté par la pile P (*fig.* 152). T′ correspond au circuit induit B, et la palette P, qui forme une sorte de lien entre T et T′, correspond au champ magnétique créé par A (*fig.* 152), qui est de son côté le lien entre A et B.

Ouvrons R (*fig.* 154) : sous l'effet du courant d'eau croissant de T, la palette se déplace et pousse le liquide de T′ à la façon d'une rame, déterminant dans celui-ci un courant liquide *inverse* du courant dans T. *Fermons* C (*fig.* 152) (on sait que, par une bizarrerie de langage, *fermer* l'interrupteur C équivaut à l'*ouvrir*, si on le considère comme un robinet) ; nous savions déjà que, sous l'influence du courant électrique croissant dans A, le champ magnétique qui se forme produit dans B un courant induit ; l'analogie précédente nous donne de plus le *sens* de ce courant :

il est *inverse* de celui du courant qui lui a donné naissance, comme la loi de Lenz nous l'aurait d'ailleurs indiqué.

Refermons R : la palette revient à sa place, donc la quantité de liquide de T′ déplacée à gauche, lors de l'ouverture du *robinet*, est égale à celle déplacée vers la droite lors de la fermeture. C'est l'image de cette loi d'électricité que la quantité d'électricité correspondant au courant induit de rupture *est égale* à celle du courant de fermeture.

Mais, à la fermeture de R, le liquide s'arrêtant brusquement, la palette est revenue à sa position de repos *bien plus vite* qu'elle n'avait pris sa position d'équilibre lors de l'établissement du courant, par suite de l'inertie considérable admise pour le liquide de T. Le courant liquide induit, *plus bref*, est par compensation *plus intense*. De même, la disparition du champ est toujours plus brutale que son établissement, et il en résulte que la quantité d'électricité du courant induit *de rupture* est mise en jeu sous un potentiel *plus élevé* que celle du courant *de fermeture*.

Nous nous souviendrons de ce fait à propos de la bobine de Ruhmkorff.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire, vous le remarquez, d'ouvrir ou de fermer complètement R pour *induire* des courants liquides dans T′. Il suffit de produire une *variation* quelconque du courant dans T en ouvrant plus ou moins R.

Donc, d'une manière générale, nous concevons que *toute variation de courant dans le circuit inducteur* A *entraîne la production d'un courant dans le circuit induit* B.

De plus, l'examen des mouvements de la palette nous fait encore voir que, si le courant inducteur *augmente*, le courant induit qui en résulte est *de sens inverse* du courant inducteur, tandis que, si ce dernier *diminue*, le courant induit est *de même sens*.

Supposons enfin que le courant liquide, après avoir augmenté constamment et produit par conséquent un courant induit de sens inverse, cesse d'augmenter, puis diminue.

La palette atteignant son inclinaison maxima, puis revenant en arrière, tend à ce moment à changer le sens du courant dans T′ : nous en conclurons par analogie que la force électromotrice induite doit changer de sens, et qu'elle s'est *annulée*

précisément alors que le courant inducteur et le champ produit avaient *leur plus grande valeur*.

Les choses se passent de même si, après avoir diminué, le courant inducteur cesse de diminuer, puis augmente.

Ainsi, la f. é. m. induite s'annule et change de sens chaque fois que le flux inducteur passe soit par un maximum, soit par un minimum[1]. Notez que je dis la f. é. m. : pas le courant, qui, par suite de la self-induction, est toujours en retard sur la f. é. m. induite, comme nous l'expliquerons en parlant du courant alternatif — et comme il serait arrivé aussi pour le courant liquide de T′ si, dans ce qui précède, je n'avais pas volontairement négligé *l'inertie*, de manière à ce que ce courant liquide puisse suivre exactement les mouvements de la palette.

Mais c'est assez interroger notre système.

Si on continuait, on finirait par lui faire dire... des bêtises!

Nous l'avons dit, nous le répétons, comme à la plus belle fille du monde, il ne faut demander aux comparaisons hydrauliques, surtout aux précédentes, que ce qu'elles peuvent donner.

Au point de vue pratique, une leçon immédiate est à tirer des faits que nous venons de constater. Si, fermant le circuit primaire, on laisse le courant atteindre son régime permanent et si on ne le rompt qu'au bout d'un certain temps, toute la dépense d'énergie correspondant au temps pendant lequel le courant reste *constant* est absolument perdue au point de vue des effets d'induction : pour créer des courants induits, nous venons de le voir, il faut faire remuer la palette, c'est-à-dire faire varier le champ : pour cela, il faut qu'il y ait variation du courant inducteur; sinon toute l'énergie de ce dernier se transforme en chaleur.

Nous concevons donc que, lorsqu'on voudra obtenir ces effets d'induction dans d'aussi bonnes conditions que possible, on devra, après avoir établi le courant primaire, l'interrompre aussitôt qu'il arrivera au régime permanent et même un peu avant s'il y a moyen. Comme la durée d'établissement du courant est petite, il en résulte qu'il faudra une succession de fer-

---

1. Une remarque analogue nous a déjà été fort utile pour établir la théorie des dynamos à courant continu (p. 187).

metures et de ruptures très rapides ; ce faisant, nous n'augmenterons pas la quantité d'énergie mise en jeu dans le champ à chaque variation de flux, mais nous diminuerons l'énergie dépensée dans le primaire tout en multipliant le nombre des courants induits et, par suite, la puissance moyenne produite dans le circuit induit.

Nécessité du fer dans les bobines d'induction mutuelle. — Si rapide qu'on fasse cette *fréquence* des ruptures, elle serait encore fort insuffisante pour empêcher le courant d'atteindre bien plus vite encore son régime permanent si les bobines ne contenaient pas de fer.

Car, dans ces conditions, la self-induction de la bobine induite étant très faible, la période d'établissement du courant serait extrêmement rapide. Donc, première conséquence de l'absence de fer, rendement très mauvais, puisque presque toute l'énergie fournie par la pile se transformerait en chaleur dans le circuit inducteur, d'après la loi de Ohm.

Seconde conséquence, aussi importante : sans fer, l'induction est peu intense ; donc, on ne peut véhiculer du primaire au secondaire à chaque variation qu'une petite quantité d'énergie ; donc, les effets obtenus sont presque nuls.

L'emploi du fer s'impose par conséquent ; mais ici, bien qu'il soit immobile comme dans les inducteurs des machines à courant continu, il est de toute nécessité de le feuilleter pour s'opposer aux courants de Foucault, qui, sans cela, absorberaient pour leur formation la presque totalité de l'énergie mise en jeu à chaque variation du champ.

TRANSFORMATEURS

Notre comparaison hydraulique de tout à l'heure nous a renseignés sur beaucoup de particularités des phénomènes d'induction mutuelle : c'est une justice à lui rendre qu'elle a laissé dans l'ombre la plus importante de toutes, la propriété de *transformer* les facteurs de l'énergie électrique.

Supposons, en effet, qu'un circuit inducteur étant donné, nous enroulions sur le noyau un circuit induit comportant une spire unique, la force électromotrice induite dans ce circuit au moment de la rupture sera faible. Une autre spire unique enroulée de la même façon produira une faible f. é. m. égale à la précédente : couplons ces deux spires en tension; les f. é. m. s'ajoutant, nous aurons un circuit de deux spires dont la f. é. m. sera double de celle d'une seule.

Rien n'empêche ce petit raisonnement d'être répété indéfiniment : A mesure que nous ajouterons les spires induites les unes aux autres, la f. é. m. induite augmentera. Quand le nombre des spires secondaires atteindra celui du primaire, les f. é. m. secondaires seront naturellement égales aux f. é. m. de self-induction primaires. Or rappelez-vous le bélier hydraulique: nous avons vu (p. 255) qu'en cas de rupture brusque la f. é. m. de self était bien plus grande que celle de la source. Il peut donc en être déjà de même de la f. é. m. induite. Nous n'avons, d'ailleurs, toujours pas de raison de nous arrêter ; continuons à ajouter à notre circuit induit les milliers de tours aux milliers de tours jusqu'à ce que la place nous fasse défaut; la f. é. m. induite augmente toujours et finit par devenir énorme.

Conclusion : alimentant le primaire avec une source de quelques volts, nous pourrons obtenir au secondaire des étincelles, des effets physiologiques et bien d'autres choses curieuses correspondant à des tensions de milliers de volts !

Mais, en même temps, les intensités mises en jeu seront très faibles, car la résistance du fil fin et long constituant le secondaire est nécessairement très grande; et, au surplus, la puissance envoyée au primaire ne pouvant être énorme, il en est ainsi à plus forte raison de la puissance secondaire, de sorte que la tension n'y peut être très grande qu'à la condition que les courants soient très faibles.

Nous réalisons donc ainsi un véritable *transformateur*, transformant l'énergie à basse tension et grande intensité en énergie à haute tension et faible intensité.

Mais il faut remarquer que nous pouvons faire le contraire. Rien ne s'oppose, en effet, à ce que nous inversions les rôles de nos deux circuits : si nous alimentons le circuit à fil fin et

long avec du courant variable à haute tension, nous recueillerons dans le circuit court à gros fil du courant de basse tension, mais de grande intensité. Ces deux modes de transformations sont l'un et l'autre d'une utilité extrême dans les installations à courants alternatifs, dont nous dirons plus loin quelques mots. Le premier mode est exclusivement utilisé dans la bobine de Ruhmkorff

---

CHAPITRE VINGT ET UNIÈME

BOBINE DE RUHMKORFF

L'un des instruments qui ont le plus fait pour vulgariser l'électricité. A bien tout ce qu'il faut, en effet, pour attirer les badauds, comme les lampions, le soir, attirent les papillons : nourrie de l'électricité discrète des piles, elle élabore la foudre dans ses flancs, la foudre pour de bon, qui éclate en crépitements sonores et tue avec aisance tous les animaux qui se présentent, ces animaux fussent-ils des bœufs : je parle bien entendu ici de ces puissants instruments comme en montrent aux foules ébahies nos habiles constructeurs, les Gaiffe, les Ducretet, d'où s'échappent en une gerbe ininterrompue des étincelles de 60 centimètres !

A maintenant d'autres cordes à son arc que de figurer dans les foires : chose curieuse, après avoir franchi sans une application vraiment intéressante la période cependant si féconde qui nous sépare de sa lointaine apparition — 1851 — s'est trouvée dotée coup sur coup en ces dernières années de trois applications plus étonnantes, plus paradoxales les unes que les autres : courants de haute fréquence, radiographie, télégraphie sans fils.

La bobine de Ruhmkorff, entre autres choses intéressantes, valut à son auteur, du gouvernement français, qui se piquait alors d'encourager la science et les savants, une récompense de 50.000 francs. Le gouvernement en eut pour son argent : l'invention de Ruhmkorff était du premier jour si bien au point que, chose étonnante en cette science changeante où le progrès du jour *tombe* celui de la veille, elle s'est conservée telle jusqu'à nos jours, sauf modifications de peu d'importance aux principales desquelles sont attachés les noms de nos compatriotes Fizeau et Foucault.

L'étude de la bobine de Ruhmkorff ne sera pas longue pour nous. Son fonctionnement est basé tout entier sur l'application textuelle des principes énoncés au cours de notre étude précédente sur l'induction mutuelle. Vous prévoyez d'après cela que si vous la démolissez, vous y trouverez :

Un noyau de fer, feuilleté pour éviter les courants de Foucault ;

Un circuit inducteur gros et court, destiné à être traversé par un courant plus ou moins intense, suivant la puissance de l'instrument, émané d'une batterie de quelques piles ou accumulateurs ;

Un circuit induit long et fin ; plusieurs dizaines de mille tours dans les gros représentants de l'espèce ;

Un dispositif pour fermer le circuit inducteur et le rompre à intervalles très rapides : l'idéal serait que le courant primaire ait juste le temps d'arriver au régime permanent pour que les effets d'induction présentent toute leur puissance, comme nous avons eu occasion de l'expliquer (p. 269).

Interrupteur à trembleur. — Cette dernière partie de l'appareil seule nécessite une explication, et encore celle-ci ne sera-t-elle pas longue, attendu que le mécanisme du dispositif interrupteur le plus répandu est tout simplement calqué sur celui de la vulgaire sonnerie électrique.

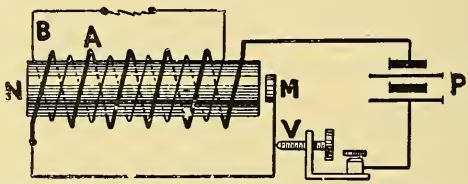


Fig. 155. — Schéma de la bobine de Ruhmkorff.

Dans le schéma figure 155, on voit que le circuit primaire comporte en série un interrupteur dont les ruptures se font par contacts en platine entre la vis de réglage V et la tige du marteau M, ce dernier placé en regard et à proximité du faisceau de fils de fer vernis N constituant le noyau de l'appareil.

Le courant émis par la pile P vient-il à passer dans le primaire, le faisceau s'aimante et le marteau, attiré, rompt le contact.

L'attraction supprimée, le marteau retombe, rétablit le contact et ainsi de suite, d'où un mouvement vibratoire très rapide permettant aux courants induits d'acquérir l'ampleur remarquable qui a décidé du succès de Ruhmkorff.

Théoriquement, cet instrument doit fournir des courants induits allant alternativement dans un sens et dans l'autre, puisque le circuit induit est nécessairement soumis à chaque émission à deux variations de flux égales et de sens contraires. Mais nous avons déjà fait remarquer (Voir p. 268) que la disparition du champ inducteur étant beaucoup plus brusque que son établissement, la tension développée à la rupture est beaucoup plus grande ; seule elle permet à l'étincelle ou à l'effluve de pouvoir vaincre la distance considérable qui, en pratique, sépare toujours les deux pôles du secondaire, de sorte que

dans la réalité, les courants induits émis par la bobine sont toujours *de même sens*.

Il y a donc un pôle + et un pôle —.

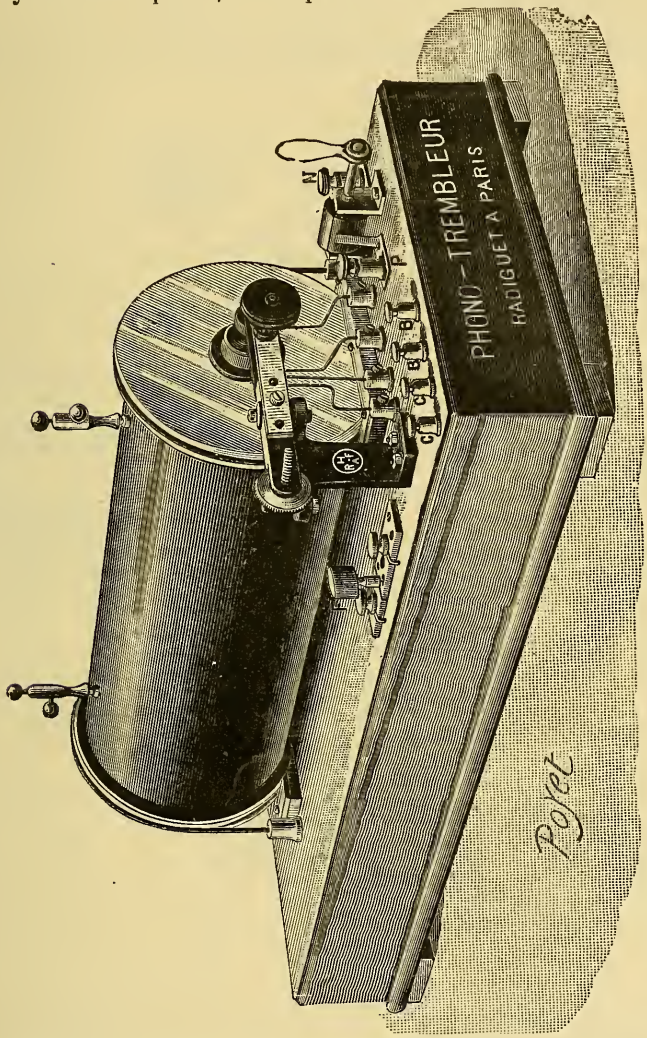


FIG. 156. — Bobine de Ruhmkorff à trembleur avec dispositif de réglage par la hauteur du son.

C'est ce qui permet d'employer la bobine de Ruhmkorff à la production des rayons cathodiques (Voir p. 391).

Le dispositif précédent, dans sa simplicité primitive, présente des inconvénients. L'étincelle de rupture est trop considérable ; sa conductibilité même empêche la résistance du primaire de devenir très grande, de sorte qu'une forte partie de l'énergie du champ magné-

tique vient s'y dépenser à chaque disparition, au détriment de l'énergie du courant induit. Nous avons déjà indiqué (p. 237) des moyens dont l'emploi permettrait d'éviter cet inconvénient. Fizeau en a trouvé un meilleur, qui consiste à shunter l'interrupteur par un petit *condensateur* — appareil dont nous reparlerons plus loin. — Au lieu

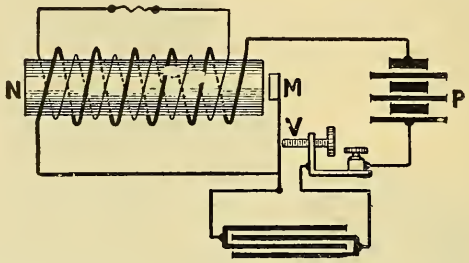


Fig. 157. — Adjonction d'un condensateur à l'interrupteur de la bobine Ruhmkorff.

de franchir l'air en une étincelle, l'extra-courant trouve dans le condensateur un chemin plus facile,

La résistance du circuit primaire peut alors devenir très grande aussitôt après la rupture, et la puissance de chaque courant induit s'en trouve considérablement accrue, puisque, ne pouvant plus se

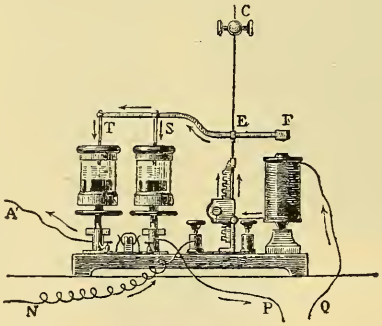


Fig. 158. — Interrupteur de Foucault.

dépenser dans le primaire, toute l'énergie du champ est obligée de se porter dans ce courant induit.

Pour les bobines de grandes dimensions, ce mode d'interruption même présente encore des inconvénients. Pour ces grands appareils, Foucault a combiné un interrupteur spécial (*fig.* 158) actionné par un circuit distinct et constitué par un électro-aimant E agissant sur une armature F montée sur une lame vibrante dont on fait varier la période d'oscillation en élevant ou abaissant le contrepoids. L'interruption du primaire de la bobine se fait entre deux godets à mercure

et deux tiges de platine T, S. Le mercure est recouvert d'une couche d'alcool qui a pour but de refroidir l'étincelle de rupture pour la faire éteindre plus vite.

Interrupteur Gaiffe. — Quand on peut disposer d'une canalisation fournissant le courant continu sous 100 ou 120 volts, on a intérêt à alimenter à son aide la bobine de Ruhmkorff, pour s'affranchir de la sujétion des piles et des accumulateurs.

C'est une disposition fréquemment employée aujourd'hui.

Sous la poussée énergique de cette diff. de pot. élevée, le courant d'excitation de la bobine arrive très rapidement à peu près à la valeur qui correspond à la saturation magnétique du noyau : l'interrupteur de Foucault, malgré ses 10 ou 15 interruptions par seconde, n'est plus assez rapide pour empêcher le régime permanent d'être atteint et même de subsister — en pure perte, ne l'oublions pas — pendant presque tout le temps de passage du courant.

Il y a donc un grand intérêt à trouver un dispositif permettant d'augmenter la fréquence des interruptions : la tension des courants induits n'en souffrira pas si le courant a encore le temps — mais tout juste — d'arriver au régime permanent ; mais le nombre de ces courants induits, et partant la puissance moyenne de la bobine, augmentera dans une mesure considérable.

M. Gaiffe est arrivé à ce résultat en commandant un interrupteur à mercure semblable à celui de Foucault par un petit moteur électrique tournant à 3.000 tours par minute.

Avec ce dispositif, on passe donc des 10 ou 15 interruptions par seconde du Foucault à 50, et la longueur des étincelles n'en est pas affectée, ce qui prouve que le régime permanent est encore atteint à chaque établissement et que, par suite, les variations de flux, tout en étant plus rapides, conservent toute leur amplitude. Les décharges sont donc individuellement aussi puissantes, mais elles se suivent quatre fois plus rapidement, de sorte que la puissance de la bobine est multipliée par 4, la dépense d'énergie étant plutôt diminuée puisque le courant reste moins de temps au régime permanent. Même dans ces nouvelles conditions, d'ailleurs, on est encore très au-dessous de la limite à laquelle la longueur des étincelles commencerait à diminuer.

Aussi M. Gaiffe a-t-il pu, en collaboration avec M. Contremoulins, combiner dans ces derniers temps un nouveau type d'interrupteur aussi simple que le précédent et qui donne aux effets de la bobine de Ruhmkorff une puissance incomparable (*fig.* 159).

Interrupteur de Wehnelt. — En dehors de ces dispositifs mécaniques, il existe un moyen fort curieux d'obtenir dans un circuit des interruptions se succédant avec une rapidité considérable.

Ouvrons ici une petite parenthèse :

Que diriez-vous de moi si je vous proposais — sérieusement — de

faire rougir une barre de fer en la plongeant un instant dans un seau *plein d'eau froide!*

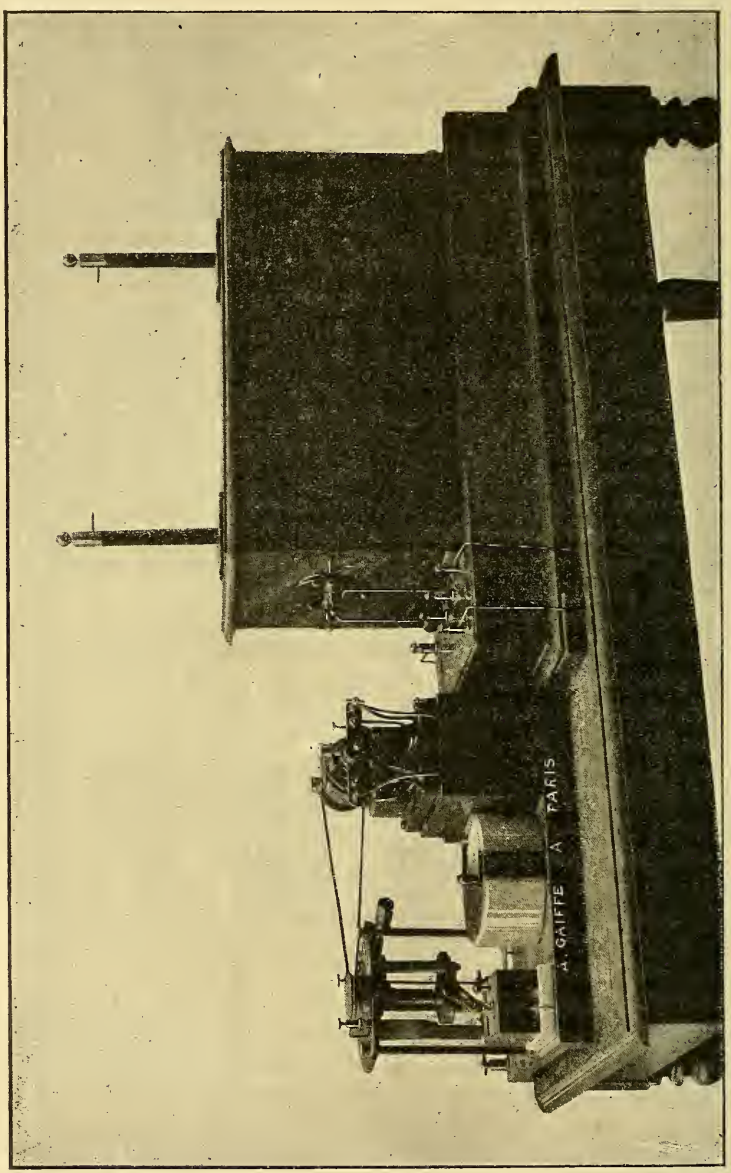


Fig. 139. — Bobine Ruhmkorff avec interrupteur Gaiffe-Contremoulins.

Vous ne diriez peut-être rien, mais vous penseriez sûrement que quelque jour, pas lointain, l'asile de Charenton comptera un habitué de plus.

Or, cher lecteur, c'est ce qui vous trompe; grâce à l'électricité et à MM. Lagrange et Hoho, rien n'est plus simple.

Reliez, au moyen d'une électrode ou feuille de plomb de quelques centimètres carrés, l'eau acidulée d'un vase de verre au pôle + d'une batterie de quelques dizaines d'accumulateurs ou d'une dynamo. Le pôle —, lui, a été relié à un fil de platine ou même de cuivre, d'un millimètre de diamètre, plongeant de quelques centimètres dans le liquide. Faites passer le courant. Un abondant dégagement d'hydrogène s'effectue sur le fil et le recouvre d'une gaine peu conductrice, dans laquelle se localise la presque totalité de la résistance du circuit : il se dégage par suite, dans cet étroit espace, une énorme quantité de chaleur, et l'électrolyse est accompagnée de crépitements, en même temps qu'apparaissent en différents endroits de la surface du fil des *points incandescents*.

Concentrons encore plus la chaleur dégagée en tirant peu à peu le fil hors du liquide : à un moment donné, les crépitements cessent. Dans la gaine s'est développée une température assez élevée pour porter toute la masse gazeuse à l'incandescence : la portion immergée du fil apparaît entourée d'une auréole lumineuse, d'un rose violacé, et ce fil lui-même, bien que plongé dans le liquide froid duquel le sépare seulement une mince couche gazeuse, se trouve porté au *rouge éblouissant!* Tel est le phénomène singulier observé d'abord par Foucault, puis soumis à une étude attentive par M. Violle dans ces dernières années.

Vous concevez maintenant qu'avec des moyens plus énergiques, point n'est difficile à MM. Lagrange et Hoho de remplacer votre fil minuscule par des pièces plus respectables, et de se livrer avec maëstria à des opérations qui les eussent envoyés au bûcher, il n'y a pas plus de quelques siècles — comme le soudage, sous la surface de l'eau, des rails en acier placés bout à bout[1].

Si intéressant que soit l'objet de cette digression, on ne peut se demander à quel titre elle arrive à cette place, rappelant un peu des... cheveux sur la soupe la discutable opportunité.

Voici :

Dans la première phase de l'expérience que nous venons d'effectuer, nous avons constaté un bruissement intense, rappelant le bruit d'un fer rouge plongé dans l'eau. Un examen soigneux du phénomène nous montrerait que ce bruit est causé par des *interruptions* rapides de courant; bien qu'en réalité le phénomène soit très complexe, on peut admettre en gros que le passage du courant pendant un instant produit une gaine de vapeur qui, non conductrice, coupe le courant, d'où condensation de la gaine, rétablissement du courant, et ainsi de suite, à un taux qui varie suivant les cas et que *deux mille interruptions*

1. On devine que le pôle — est choisi pour y attacher les pièces à travailler pour profiter de l'afflux d'hydrogène, qui empêche radicalement leur oxydation.

par seconde ne sont pas pour effrayer. Mais vous l'êtes, vous, effrayé !

— Peuh !

Nous avons beaucoup mieux que cela à vous montrer, et, tout à l'heure, c'est par *millions* que nous compterons !

Il n'en est pas moins vrai que nous voici dotés, pour la bobine de Ruhmkorff, d'un interrupteur merveilleux. Il suffira (*fig.* 160) de placer en série avec le primaire de la bobine l'appareil si simple que nous manipulions tout à l'heure pour avoir, quant à la rapidité, un interrupteur à nul autre pareil.

C'est ce qu'a fait en 1898 le Dr Wehnelt, suivi par beaucoup d'autres expérimentateurs que les résultats, que la simplicité du dispositif avaient enthousiasmés.

Effectivement, quand une bobine est alimentée par un semblable interrupteur convenablement réglé, ce ne sont plus des étincelles

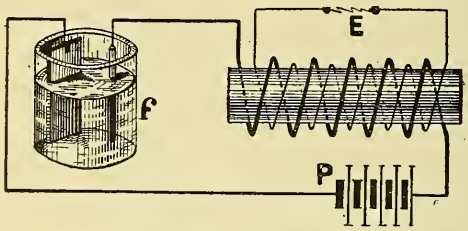


Fig. 160. — Schéma de l'application de l'interrupteur Wehnelt à la bobine de Ruhmkorff.

isolées qui éclatent entre les extrémités du fil induit, c'est un véritable *torrent de flammes*. Si les conditions sont convenables, la longueur des étincelles elles-mêmes peut être considérablement augmentée, ce qui doit provenir surtout de l'échauffement de l'air traversé par une semblable décharge. Ainsi, dans des essais effectués par M. Hospitalier, une bobine de 6 centimètres d'étincelle, alimentée sous 100 volts par un interrupteur Wehnelt donnant 1.400 interruptions à la seconde, a fourni un faisceau ininterrompu d'étincelles de la grosseur d'un crayon et de 15 à 18 centimètres de longueur !

Malheureusement, cet appareil est capricieux.

Il s'arrête quelquefois sans qu'on sache pourquoi.

L'eau acidulée qu'il nécessite est tôt amenée à une ébullition qui ne laisse pas d'être désagréable, en même temps qu'elle compromet la régularité du fonctionnement.

L'appareil nécessite une batterie de force électromotrice élevée que l'on n'a pas toujours à sa disposition.

Bref, il semble qu'on se soit fait quelques illusions sur l'efficacité de cet interrupteur, et le bruit qu'avait fait son apparition commence à se calmer.

On peut le regretter.

CHAPITRE VINGT-DEUXIÈME

UNE NOUVELLE GRANDEUR ÉLECTRIQUE

LA CAPACITÉ

Bouteille de Leyde. — Charge et décharge des condensateurs. — Pour me permettre de vous donner une idée des phénomènes très intéressants que nous allons maintenant rencontrer, il me faut vous présenter d'abord une nouvelle grandeur électrique, la *capacité*, dont l'intervention se traduit par bien des bizarreries, par bien des faits en apparence abracadabrants et que, cependant, nous essaierons d'expliquer.

Pour nous faire une idée de cette nouvelle venue, nous allons commencer par la voir à l'œuvre.

Voyez ce flacon de verre *mince* (*fig.* 161) ; sa surface externe, y compris le fond et jusqu'aux 2/3 de la hauteur, est recouverte d'une feuille de papier d'étain. L'intérieur est rempli d'autres feuilles d'étain chiffonnées, mises en relation électrique avec l'extérieur par une tige métallique traversant le bouchon, recourbée en un crochet terminé par une boule.

Cet appareil, comme vous voyez, n'a aucun rapport avec ceux que nous avons disséqués jusqu'ici.

Approchez-le, en le tenant à la main par la feuille d'étain ou *armature* extérieure, d'une de ces machines statiques à frottement donnant d'inoffensives étincelles, longues et grêles. Votre chien, qui nourrit apparemment des sympathies pour la physique, suit votre manège d'un œil interrogateur. Sous prétexte d'explications, penchez-vous vers lui et donnez-lui

à flairer le crochet de la tige métallique : C'en est fini, jamais plus la pauvre bête ne remettra les... pattes au laboratoire !

C'est qu'au moment où, de confiance, il approchait son museau, une étincelle blanche, sonore, violente, a éclaté, le secouant dans tout son être d'une secousse énergique qui l'a chassé du laboratoire, hurlant à tous les vents. De votre côté, vous n'avez pas été sans recevoir un choc assez désagréable, mais vous l'avez subi de pied ferme, en vertu de ce fait qu'il n'est rien de tel, pour donner de l'héroïsme aux gens, que le plaisir de jouer un mauvais tour.

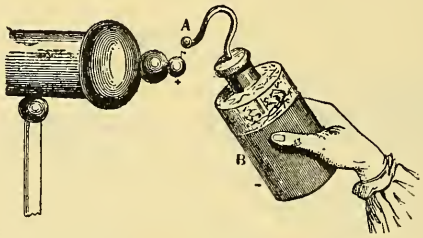


Fig. 161. — Charge de la bouteille de Leyde.

Votre appareil est une *bouteille de Leyde;* le phénomène que vous avez constaté est dû à la *capacité* de la bouteille, et celle-ci n'est autre chose qu'un *condensateur.*

Voyons les choses d'un peu plus près... sans approcher par trop notre nez.

L'expérience que nous venons de réaliser nous montre deux choses :

1° A la faveur d'un *courant de charge* qui s'est manifesté, lui aussi, par des étincelles à l'approche de la machine, l'énergie électrique s'est accumulée d'une manière durable dans la bouteille, puisque nous pouvons en tirer une étincelle non seulement tout de suite après la charge, mais même plusieurs heures après si le temps est sec ;

2° Les caractères de l'énergie fournie par la source ont changé : les étincelles de cette source étaient maigres, grêles, presque... aphones ; l'étincelle de *décharge* du condensateur est volumineuse, brillante, bruyante.

Notre bouteille se comporte donc comme un *réservoir d'énergie électrique*, emmagasinant pendant un certain temps l'énergie correspondant aux étincelles longues et grêles de la machine de charge, et restituant cette énergie d'un seul coup, lorsque les deux armatures sont réunies par un circuit conducteur [1].

Bien entendu, les deux armatures ne peuvent être portées qu'au potentiel de la source de charge ; les étincelles de la bouteille de Leyde ne peuvent donc être plus longues que celles de la source ; au contraire : mais elles sont infiniment plus nourries.

Condensateurs industriels. — La bouteille de Leyde n'est pas un condensateur bien fameux.

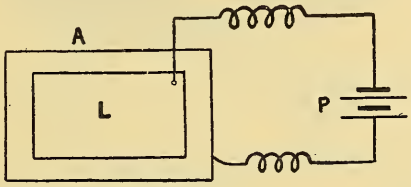


Fig. 162. — Condensateur à lame de verre.

On la remplace souvent en pratique par une plaque mince A de verre ou d'un autre isolant, d'un autre *diélectrique*, comme on dit aussi, mica, papier paraffiné, etc., recouvert sur chacune de ses faces d'une feuille de papier d'étain L (*fig.* 162).

Pour charger ce condensateur, on relie l'une des feuilles à un pôle de la source, l'autre au second pôle.

Comme la capacité de cet appareil est encore faible, on réunit en *quantité* un grand nombre d'éléments semblables en les empilant les uns sur les autres, ce qui permet de plus d'utiliser les deux faces de chaque feuille. Toutes les feuilles paires sont reliées à une borne commune, toutes les feuilles impaires à l'autre (*fig.* 163).

Lorsqu'on expérimente ces appareils, on constate que leur

1. Dans l'expérience précédente, ce circuit était constitué par le corps du chien le sol et votre propre corps, circuit peu conducteur, suffisant cependant par suite de l'énorme tension agissante.

capacité — appréciée pour l'instant par la grandeur des effets produits — est d'autant plus grande que la *surface* d'électrodes est plus grande, d'où l'empilement d'un grand nombre de feuilles les unes sur les autres ; cette capacité est aussi d'au-

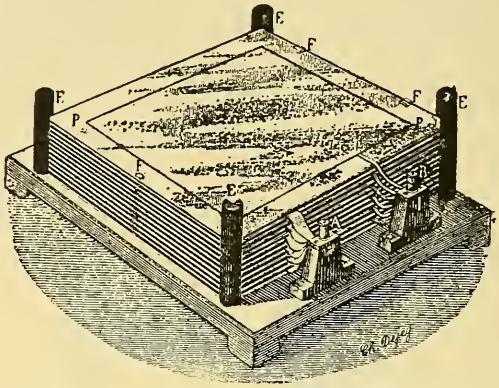


Fig. 163. — Condensateur à lames multiples.

tant plus grande que l'*épaisseur* du diélectrique est moindre ; on constate enfin que la *nature* de l'isolant influe aussi énormément : toutes choses égales d'ailleurs, un condensateur en mica est beaucoup meilleur qu'un condensateur en verre.

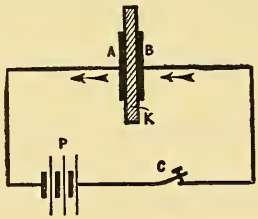


Fig. 164. — Passage du courant à travers un condensateur.

Rien de tout cela n'a l'air de vous surprendre ! Je vois bien le raisonnement que vous vous faites : avec les idées sur les isolants que vous vous êtes mises en tête, vous vous dites certainement que, puisque le circuit est interrompu entre A et B (*fig.* 164) par la couche mince d'isolant K, et que néanmoins le courant de charge du condensateur passe tout de même, il faut que cet isolant soit en réalité un peu conducteur à la fa-

veur de sa minceur ; il vous semble tout naturel alors que moindre est l'épaisseur, plus grand est le courant de charge, et, par suite, la décharge : quant à l'influence de la nature du diélectrique, elle ne vous embarrasse pas davantage, les meilleurs diélectriques devant être, suivant vous, ceux qui sont les moins bons isolants.

Eh bien! ce n'est pas cela, mais pas cela du tout! Tous les bons diélectriques sont de *parfaits isolants*, au moins dans l'habituelle acception donnée à ce mot.

J'espère que vous voilà dérouté?

Représentation hydraulique de la capacité. — Véritable rôle des isolants. — Le moment est donc bien choisi pour

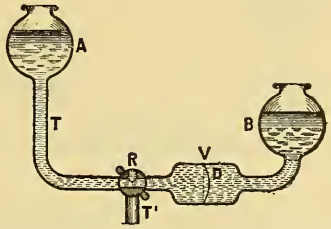


Fig. 165. — Représentation hydraulique de la capacité.

faire à nos comparaisons hydrauliques un nouvel appel : elles vont s'appliquer ici avec une exactitude remarquable qui nous permettra de faire le jour sur ces faits obscurs et d'éclairer d'une façon inattendue le véritable rôle de ce qu'on appelle à tort des *isolants*[1].

Imaginons (*fig.* 165) un vase V, ouvert à ses deux extrémités, entièrement *plein d'eau*, divisé en deux compartiments indépendants par un *diaphragme élastique* D qui l'obture entièrement. Ce vase sera pour nous l'équivalent hydraulique d'un condensateur.

Mettons-le, par l'ouverture du robinet R, en relation avec un réservoir d'eau plus élevé, A : le diaphragme D se déforme et refoule vers B l'eau du compartiment d'arrière; il y a de A

1. J'ai appliqué le mode de représentation ci-dessous à l'étude du courant continu et des courants alternatifs dans deux articles publiés par *la Lumière Électrique* en 1894.

vers B production d'un *courant de charge*. Mais ce courant diffère de l'écoulement dans un simple tuyau en ce qu'il va en *diminuant* à mesure que la *tension* de la membrane augmente et s'arrête lorsque cette tension fait équilibre à la pression exercée par l'eau de A : c'est l'image exacte du courant de charge d'un condensateur qui, d'abord très intense, s'annule bientôt comme si la résistance du circuit, d'abord très faible, devenait infinie : j'appelle en passant votre attention sur cette anomalie de la résistance d'un circuit qui, malgré l'interposition d'une matière *isolante*, est *très petite* au premier instant.

Dans notre comparaison hydraulique, qu'est devenue l'énergie mise en jeu par la descente du liquide de A vers V ? Cette éner-

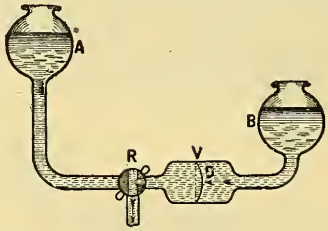


Fig. 166. — Si, lorsque la membrane est gonflée, on met R en communication avec un tube T′, on a production d'un courant de décharge inverse du courant de charge.

gie ne s'est pas dissipée, au moins totalement ; une partie s'est *emmagasinée* sous forme de tension de la membrane ; cette énergie peut être restituée par la détente de la membrane, qui provoque un *courant de décharge* inverse du courant de charge lorsque (*fig.* 166) nous ouvrons par le robinet à *trois voies* R un chemin T′ au liquide comprimé. C'est l'exacte représentation du courant de décharge d'un condensateur lorsque nous relions ses deux armatures par un circuit conducteur, auquel cas nous retrouvons dans l'étincelle et dans le courant de décharge toute l'énergie qui avait été *emmagasinée* lors de la charge.

Dans la représentation que nous venons d'imaginer, on voit que la charge du condensateur nous apparaît comme causée par un courant traversant d'*un bout à l'autre* tout le circuit, comme si ce circuit était entièrement métallique ; et il ne faut pas, comme on le fait trop souvent, assimiler le condensateur

à un récipient *qui se remplit d'électricité* comme un vase se remplit d'eau : le vase V est plein d'eau après la charge comme avant : il y a eu simplement *déplacement* de liquide. Ce qui a varié, pendant la charge, c'est uniquement la *tension* de la membrane ; c'est à augmenter cette tension jusqu'à une certaine limite que s'est dépensée l'énergie développée par le courant liquide ; réciproquement, pendant la décharge, c'est cette membrane qui, revenant à l'état initial, a restitué l'énergie emmagasinée.

C'est donc elle qui, dans tout cela, joue le rôle capital.

Si notre comparaison est exacte, il doit en être de même dans notre condensateur pour l'équivalent de la membrane, c'est-à-dire pour le diélectrique, pour « l'isolant », qui *semble* barrer le chemin au courant électrique, comme la membrane *semblait* le barrer au courant liquide.

Effectivement, ce rôle du diélectrique est *capital.*

Nous avons vu que sa nature influe beaucoup sur la capacité du condensateur ; au contraire, on constate aisément par l'expérience que la *nature du métal des électrodes* de ce condensateur *n'influe* absolument *pas.* On donne, en pratique, la préférence à l'étain parce qu'il peut se laminer en feuilles plus minces et tient moins de place : voilà tout.

L'expérience curieuse et classique de la bouteille de Leyde à armatures mobiles (*fig.* 167) vient nous fournir encore des renseignements précieux.

Cet appareil se compose de trois parties, A, B, C, indépendantes les unes des autres et qui, réunies, donnent l'ensemble de gauche de la figure, lequel peut se charger et se décharger comme à l'ordinaire. Mais qu'au lieu de décharger la bouteille préalablement chargée on la démonte, qu'on mette les armatures au contact l'une de l'autre, puis qu'on remonte la bouteille, *on obtiendra une étincelle* comme si on n'avait rien modifié : preuve irréfutable, n'est-ce pas, que l'énergie n'était pas localisée sur les armatures, *mais dans le diélectrique.*

Autre analogie encore, si les précédentes ne vous suffisent pas, entre le diélectrique du condensateur et la membrane de la figure ; si le condensateur est soumis à une différence de potentiel trop élevée, le diélectrique est *percé*, de même que la

membrane *crève* lorsque la différence de niveau entre A et B devient trop grande.

De cette analogie d'effets, nous conclurons à l'analogie des causes, et nous dirons que l'accumulation d'énergie produite par le condensateur est obtenue grâce à *une modification dans l'état moléculaire du diélectrique* analogue à la variation de tension de la membrane ; cette modification est produite par le courant de charge, qui est le véhicule de l'énergie nécessaire pour opérer cette modification. La charge du condensateur correspond à une quantité d'électricité *déplacée* et le véritable rôle des isolants, du verre, *de l'air*, etc., c'est qu'ils sont perméables à l'électricité, mais d'une façon particulière, en don-

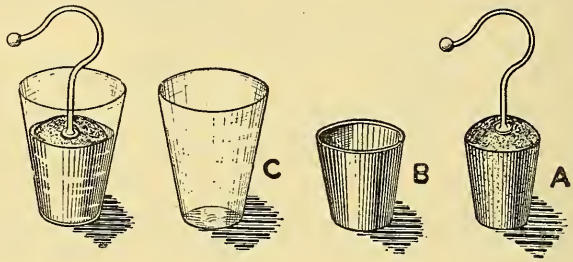


Fig. 167. — Expérience de la bouteille de Leyde à armatures mobiles. A gauche, bouteille complète ; à droite, bouteille démontée en ses trois parties.

nant lieu à des *courants de déplacement* qui modifient leur état moléculaire.

Vous voyez apparaître par le bout de l'oreille la *télégraphie sans fils*.

Parlons un peu maintenant unités et équations. C'est l'inévitable formalité — vous le savez de reste ! — qui accompagne la présentation de chaque grandeur électrique.

Reprenons notre analogie.

Soumettons le vase V à l'action d'une différence de niveau constante, mais employons successivement des membranes de natures, d'épaisseurs différentes; à chaque membrane correspond le déplacement d'une certaine quantité de liquide, représentée par le volume de la poche formée par le diaphragme. La grandeur de ce déplacement, de cette poche,

dépend de la pression et d'un facteur que nous pourrons appeler la *capacité* de la membrane.

Or, nous savons qu'à la quantité de liquide correspond électriquement la quantité d'électricité (p. 19). On comprend donc que la quantité Q d'électricité déplacée dans la charge d'un condensateur sous l'effet d'une tension E est constante pour un condensateur donné et dépend de sa *capacité* C, et que, d'autre part, elle est proportionnelle à la différence de potentiel agissante E, doublant, triplant avec elle, de même que le volume de la poche de notre membrane. On a :

$$Q = CE \quad \text{ou} \quad C = \frac{Q}{E}.$$

C'est-à-dire que la quantité d'électricité mise en jeu dans la charge d'un condensateur est égale au produit de la capacité par la diff. de pot. agissante.

L'unité de capacité est le **farad,** ainsi appelé en l'honneur du savant anglais Faraday, dont le nom est plus d'une fois revenu sur nos lèvres au cours de cette étude.

Qu'est-ce que le farad? Pour le savoir, prenons $Q = 1$ coulomb, $E = 1$ volt. L'équation $C = \frac{Q}{E}$ devient $C = \frac{1}{1} = 1$ farad.

Le farad est donc la capacité d'un condensateur qui, chargé avec une diff. de pot. de 1 volt, *mettrait* en jeu une quantité d'électricité de 1 coulomb ; mettrait, avons-nous dit : c'est avec intention que nous employons le conditionnel, car un tel condensateur serait *énorme*. Aussi exprime-t-on les capacités des condensateurs industriels en *microfarads*.

Dans l'analogie hydraulique, nous nous rendons aisément compte que la capacité de la membrane est d'autant plus grande qu'elle est plus grande et plus mince ; ceci s'applique mot pour mot aux condensateurs, dont la capacité augmente avec la surface et la minceur du diélectrique ; ce dernier fait semble fournir un moyen fort économique d'augmenter tant qu'on veut la capacité des condensateurs en les constituant avec des feuilles très minces de diélectrique. Moins il y en a, plus cela fait de capacité, moins cela coûte ; malheureusement, les grandes capacités à diélectrique trop mince sont frappées

d'une *incapacité* rédhibitoire, elles *claquent* avec ensemble dès qu'on les soumet à la tension, de même qu'une membrane trop mince crève sous la moindre pression.

Indépendamment des dimensions, la capacité d'un condensateur dépend enfin, comme nous savons (p. 284), de la nature du diélectrique, dont chacun est caractérisé par une *capacité inductive spécifique*, qui, égale à 1 pour l'air, est de 1,9 pour le verre, de 2 pour la paraffine et atteint 5 avec le mica.

Passons à un autre exercice.

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES

Mécanisme de la décharge oscillante. — Haute fréquence. — Nous sommes, en effet, suffisamment armés maintenant pour aborder l'étude de phénomènes qui passent auprès du commun des mortels — disons même du commun des électriciens — pour fort mystérieux.

Si, dans un circuit électrique, on rencontre à la fois deux des grandeurs que nous avons étudiées séparément jusqu'ici, self-induction et capacité, la combinaison de ces deux grandeurs peut produire des effets particulièrement curieux, connus sous le nom d'*oscillations électriques* ou *décharges oscillantes*.

L'importance de ces phénomènes est très grande. C'est grâce à eux que le professeur Hertz, dans de magistrales expériences, a pu donner les preuves les plus convaincantes de l'*identité de la lumière et de l'électricité*. C'est à leur aide qu'ont pu être tentées ces paradoxales expériences de télégraphie sans fils, qui, suivies d'abord avec un scepticisme un peu ironique par les télégraphistes de la vieille école, commencent à les intéresser singulièrement, grâce à la méritoire persévérance de l'Italien Marconi. C'est avec eux, enfin, que l'on produit ces courants de haute fréquence employés par Tesla dans des expériences retentissantes et hautement préconisés pour la pratique médicale par M. d'Arsonval.

Il est donc essentiel d'en saisir le mécanisme.

En mettant à profit les ressources de la haute analyse

mathématique, il est possible d'expliquer ces phénomènes et même de les prévoir : c'est ce qu'a fait, dès 1855, l'illustre lord Kelvin, en ce temps-là encore sir William Thomson. Mais ce procédé n'est pas « à la portée de tout le monde », et nous allons voir à le remplacer par autre chose de moins transcendant.

D'abord, en gros, que sont les phénomènes en question ?

Voici un condensateur C chargé préalablement à l'aide d'une diff. de pot. constante (*fig.* 168).

Fermons brusquement ce condensateur sur un circuit L possédant une self-induction convenable. S'il n'y avait pas de self-induction, il y aurait simplement, comme nous l'avons

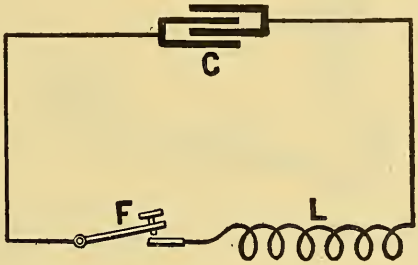


Fig. 168. — Production des oscillations électriques.

vu tout à l'heure, un courant de décharge allant de l'armature positive du condensateur à l'armature négative et dans lequel toute l'énergie emmagasinée serait dépensée en frottement, en chaleur.

Mais, si la self-induction est suffisante, il y aura production d'un courant *pulsatoire* dont les oscillations pourront se succéder, vous m'entendez bien, à raison de dizaines de millions par seconde !

Avouez que ces courants de *haute fréquence* n'ont pas volé leur nom !

Pour comprendre ce phénomène bizarre, jetez un simple coup d'œil sur la figure 169. Vous y reconnaissez la figure que nous avons employée tout à l'heure pour expliquer les propriétés de la capacité, mais nous supposerons que le tuyau T qui relie A à V est gros et très long et correspond par suite, vous le savez, à une *grande self-induction*. Nous allons donc

ici faire intervenir l'*inertie*, que nous avons négligée (p. 285) dans notre comparaison.

Ouvrons brusquement R : le liquide passe de A en V en tendant la membrane jusqu'à ce que la tension de celle-ci fasse équilibre à la pression de A. Mais, à ce moment, le liquide du tuyau, étant animé d'une vitesse assez grande de A vers V, *ne peut s'arrêter brusquement ;* en vertu de son inertie, qui est grande, et de la vitesse acquise, il continue à pénétrer dans V, dont il tend par conséquent la membrane *plus* qu'il ne correspond à la pression de A. Lorsque enfin le mouvement s'arrête, la membrane *trop tendue* se détend, refoule le liquide vers A,

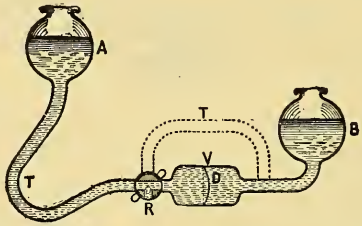


Fig. 169. — Lorsqu'on ouvre *brusquement* R, il se produit dans T un courant pulsatoire allant de A vers B, puis de B vers A ; image des oscillations électriques.

dépasse, en sens contraire, sa position d'équilibre par suite de l'inertie — et ainsi de suite.

Il y a donc production d'*oscillations* du liquide dans le tube, oscillations qui se continuent avec des amplitudes graduellement décroissantes.

Telle est précisément l'image des *oscillations électriques*, à cela près qu'au lieu de quelques oscillations par seconde on peut, comme nous l'avons dit, en avoir des millions [1]. Nos oscillations hydrauliques étaient provoquées, on s'en rend compte, par l'*échange continuel* d'une même quantité d'énergie entre la membrane où elle était emmagasinée sous forme d'une distorsion des molécules, et le liquide où elle s'emmagasinait

1. Et à cela près aussi que ce que nous venons de voir est plutôt une *charge oscillante* de la membrane, tandis que le phénomène électrique habituel est la *décharge oscillante :* pour avoir l'analogie hydraulique aussi textuelle que possible, il faut supposer que le vase à diaphragme, préalablement chargé par A, est brusquement déchargé sur un tuyau plein d'eau à *grande inertie*, indiqué en pointillé en T' sur la figure 169. Rien n'est changé aux raisonnements ci-dessus.

sous forme de mouvement. De même, dans les oscillations électriques, l'énergie qui provoque les oscillations est l'objet d'un perpétuel jeu de raquettes qui la renvoie du condensateur où elle était emmagasinée sous forme de déformation des molécules du diélectrique, à la self-induction où elle vient s'absorber sous forme de champ magnétique.

On peut même aller plus loin et, à l'aide de cette comparaison hydraulique si simple, apprécier exactement l'influence des divers éléments en jeu sur les caractères de la décharge oscillante des condensateurs.

Par exemple, si le diaphragme est grand, sa contre-pression s'accroît lentement ; les oscillations sont lentes, mais de grande amplitude. Si, de même, dans un circuit électrique, on *augmente* la capacité, on rend les oscillations plus *lentes* — tout est relatif !

Si la masse de liquide est grande, lorsqu'elle est en mouvement dans une direction donnée, elle ne peut s'arrêter brusquement et les oscillations, dans ce cas, sont encore lentes : il en est de même en électricité dans le cas d'une *grande* self-induction.

A plus forte raison les oscillations seront-elles *encore plus lentes* si la capacité et la self-induction sont grandes *toutes deux*. On pourra ainsi descendre jusqu'à cent oscillations et moins par seconde, tandis qu'en prenant self et capacité très petites, on est monté jusqu'à *cinquante milliards :* c'est tout ce qu'on a pu faire jusqu'ici.

Vous avouerez que c'est déjà gentil !

On cherche cependant à aller énormément plus vite encore et voici pourquoi : si on pouvait avoir des oscillations *dix mille fois* plus rapides encore que les plus rapides obtenues jusqu'ici, les *ondes lumineuses* elles-mêmes seraient reproduites !

D'autre part, la rapidité avec laquelle s'éteignent les oscillations du courant liquide dépend naturellement de l'influence des frottements, car nous avons vu que les oscillations sont entretenues par la même quantité d'énergie, qui se transmet, à chaque pulsation, de la membrane au liquide et inversement.

Si les frottements sont peu importants, cet échange pourra

s'effectuer très longtemps — ici encore très longtemps est une façon de parler — sans diminution sensible ; s'ils sont considérables, l'énergie en jeu sera absorbée très vite et les oscillations s'affaibliront et disparaîtront presque instantanément.

Si les frottements dépassent enfin une certaine limite, c'est-à-dire si le tuyau T devient trop étroit, toute l'énergie du courant de décharge sera absorbée d'un coup, et les oscillations ne se produiront pas.

Pour des raisons absolument identiques, les oscillations électriques ne se produisent dans un circuit comportant de la self-induction et de la capacité que si la résistance ohmique du circuit ne dépasse pas une certaine valeur, et elles *s'amortissent* d'autant moins vite que cette résistance est moins considérable. Si elle pouvait être nulle et si on ne soustrayait pas une partie de l'énergie mise en jeu par la haute fréquence pour l'utiliser dans les phénomènes qu'elle peut provoquer, les oscillations, une fois établies, persisteraient indéfiniment, car, théoriquement, l'énergie absorbée à la charge d'un condensateur est entièrement restituée à la décharge, de même que celle absorbée à la création d'un champ magnétique est restituée tout entière lors de la disparition de ce champ.

Il est encore une condition nécessaire pour provoquer les oscillations électriques : c'est que la fermeture du circuit soit *instantanée*. L'analogie hydraulique rend encore compte de ce fait, car on voit que, si l'on ouvrait très lentement le robinet R, le liquide s'écoulerait très doucement et ne pourrait plus intervenir par sa vitesse acquise.

Il ne peut donc être question, pour provoquer les oscillations électriques, de manœuvrer mécaniquement ou à la main des interrupteurs, car, électriquement parlant, cette manœuvre est infiniment lente. Ainsi se trouve justifié l'emploi général d'excitateurs à *étincelles* pour provoquer les oscillations, la production d'une étincelle correspondant, comme l'a remarqué M. Poincaré, à la manœuvre infiniment rapide d'un interrupteur.

RÉSUMÉ

Un condensateur est constitué par des lames isolantes sur les deux faces desquelles sont appliquées des feuilles ou *armatures* métalliques. Si on réunit les deux armatures d'un condensateur aux deux pôles d'une source d'électricité, il est traversé par un *courant de charge* qui a pour effet de modifier l'état moléculaire du *diélectrique*. Cette modification est durable ; si, même après un certain temps, on vient à relier les deux armatures par un circuit conducteur, on a, révélé par une étincelle, un *courant de décharge* dans lequel la quantité d'énergie qui avait été cédée au diélectrique est toute entière restituée et après lequel le diélectrique se trouve ramené à son état initial. Cette expérience prouve que les isolants sont, eux aussi, perméables à l'électricité, mais d'une manière spéciale.

La *capacité* d'un condensateur s'apprécie à la quantité d'électricité mise en jeu pendant la charge, laquelle, en effet, est égale au produit de la diff. de pot. de charge par la capacité. Celle-ci s'exprime en *farads* et, pratiquement, en microfarads. Elle est d'autant plus grande que la surface des armatures est plus grande, l'épaisseur des feuilles du diélectrique moindre et la *capacité inductive spécifique* de celui-ci plus élevée.

Si on décharge brusquement un condensateur chargé dans un circuit comportant de la self-induction, l'ensemble du circuit est parcouru par un *courant oscillatoire* dont la fréquence est d'autant plus grande que la capacité et la self sont plus petites. Ce mouvement oscillatoire *s'amortit* d'autant plus vite que la résistance ohmique du circuit est plus grande ; si cette résistance dépasse une certaine limite, les oscillations ne se produisent plus : on a un simple courant de décharge.

CHAPITRE VINGT-TROISIÈME

HAUTE FRÉQUENCE

PRODUCTION DE LA HAUTE FRÉQUENCE

Dispositif de Tesla. — Le secondaire d'une bobine de Ruhmkorff ou d'une machine à courants alternatifs (voir plus loin) est relié à un circuit comprenant un condensateur C, une self-induction L. Le

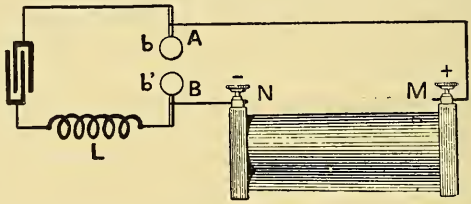


Fig. 170. — Production des hautes fréquences : dispositif de Testa.

secondaire de la bobine étant *très résistant*, il en est de même, à plus forte raison, de l'ensemble du circuit MACLBN ; or nous savons, pour l'avoir vu il n'y a qu'un instant, que les oscillations électriques ne peuvent se produire dans un circuit *trop résistant* ; le condensateur se charge donc progressivement, sans oscillations, lors du flux de courant émis par la bobine.

A mesure que la charge se complète, la différence de potentiel aux bornes A et B augmente. Elle atteint bientôt une valeur suffisante pour qu'une étincelle éclate entre les deux boules voisines *b*, *b'* : étincelle, chaude, conductrice, qui substitue au circuit très résistant MACLBN le circuit *peu résistant* *b*ACLB*b'*. Nous savons que dans ces nouvelles conditions, l'énergie emmagasinée dans le diélectrique du condensateur va provoquer dans le circuit une décharge oscillante de haute fréquence à la faveur de laquelle l'étincelle, continuellement entretenue, maintiendra la conductibilité de l'intervalle *bb'*.

Cependant les oscillations iront nécessairement en s'affaiblissant, en s'amortissant rapidement, et s'éteindront bientôt ; mais un nouvel afflux de la bobine viendra alors recharger le condensateur, provoquer une nouvelle étincelle qui servira de point de départ à une nouvelle série d'oscillations, et ainsi de suite, de sorte que, graphiquement, le phénomène se présentera sous l'aspect indiqué par la figure 171, à cela près que les séries successives seront bien plus éloignées les unes des autres qu'il n'est indiqué.

La rapidité avec laquelle se succèderont ces séries de décharges

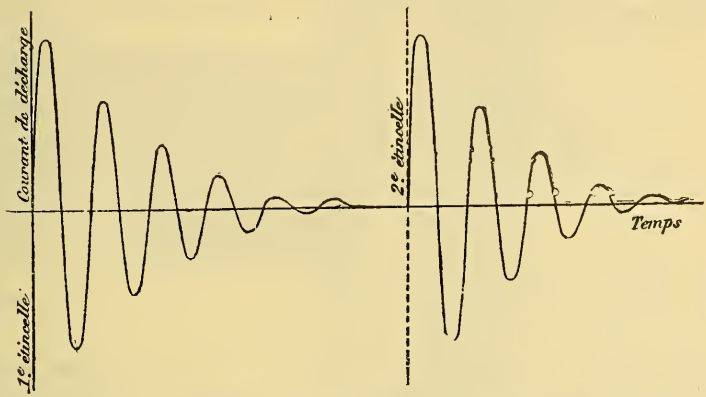


Fig. 171. — Représentation graphique des oscillations électriques.

oscillantes ne dépend naturellement que de la rapidité des émissions de la source : elle peut d'ailleurs être assez grande, puisque nous avons vu que la bobine de Ruhmkorff peut fournir jusqu'à 50 émissions par seconde.

Quant à la fréquence des oscillations dont chacune des 50 étincelles par seconde provoque une série, nous savons qu'elle ne dépend *uniquement* que du produit de la capacité par la self : elle atteignait plusieurs centaines de mille par seconde dans les célèbres expériences de Tesla.

Dispositif d'Arsonval. — M. d'Arsonval qui, dès 1890, a attaché son nom à l'étude des courants de haute fréquence et en a fait à la médecine, entre autres, les applications les plus remarquables, a perfectionné beaucoup le dispositif précédent en le rendant susceptible d'un emploi plus sûr.

Nous verrons tout à l'heure que l'un des caractères les plus intéressants des courants de haute fréquence consiste dans leur innocuité absolue pour la vie humaine.

Mais, d'autre part, nous savons déjà que les condensateurs sont des appareils de complexion délicate, susceptibles de crever sous l'in-

fluence de la tension électrique. Qu'un semblable accident survienne à l'unique condensateur de Tesla, adieu les courants de haute fréquence, et adieu aussi la sécurité, car, si on vient alors à toucher deux points du circuit CLB (*fig.* 170), on recevra directement la décharge de haute tension et de basse fréquence de la bobine; le malade, si c'est d'un malade qu'il s'agit, *risquera* fort d'être guéri du coup!

Pour éviter radicalement ce léger inconvénient, M. d'Arsonval a recours à un artifice bien simple.

Il divise en deux la capacité nécessaire et place la self-induction entre ces deux parties, réalisant ainsi le montage de la figure 172.

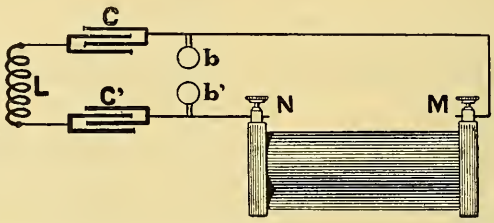


Fig. 172. — Production des hautes fréquences : dispositif de M. d'Arsonval.

De cette manière, l'un des condensateurs venant à *claquer*, le circuit n'en restera pas moins, grâce à l'autre, parcouru par d'inoffensives décharges oscillantes dont la période sera seulement un peu allongée. On aura ainsi le loisir de remédier à l'*incident* avant qu'il en soit résulté d'*accident* fâcheux.

EFFETS DE LA HAUTE FRÉQUENCE

Action physiologique. — Applications médicales. — Pour qualifier les effets des courants de haute fréquence, un mot se présente sous ma plume dont j'ai déjà fait un usage abusif, celui de merveilleux.

Il a déjà été dit que les courants de haute fréquence présentent pour la vie humaine une innocuité absolue. Ce résultat bizarre était absolument impossible à prévoir, car, lorsqu'on en est seulement aux courants présentant des interruptions peu fréquentes, on trouve précisément que la douleur causée à l'organisme humain par ces courants augmente rapidement avec le nombre, avec la fréquence des interruptions : c'est ce qui rend si douloureuse à supporter la décharge d'une bobine de Ruhmkorff, même de très médiocre puissance.

M. d'Arsonval a trouvé que cette aggravation des effets *continuait*

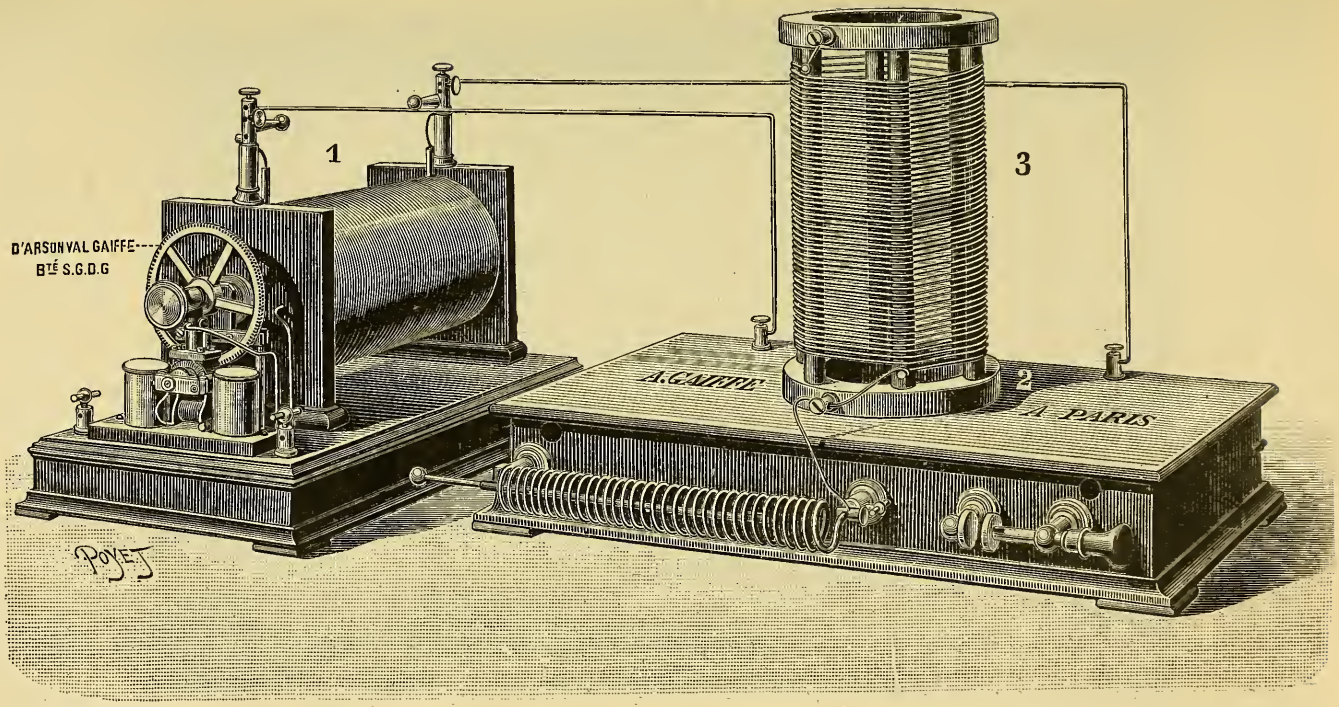


Fig. 173. — Dispositif de M. d'Arsonval pour la production des courants de haute fréquence.

et, toutes choses égales d'ailleurs, atteignait son maximum vers la fréquence de 2.500 par seconde.

Si on continue à faire croître la fréquence, l'action physiologique *diminue* pour s'*annuler* au voisinage de 10.000 périodes par seconde.

C'est tout au plus si, au-delà de cette fréquence, des courants même très intenses provoquent une légère anesthésie des membres ou des organes soumis à leur action.

M. d'Arsonval a pu faire passer à travers son corps des courants énormes, 2 ou 3 ampères et plus, sans en ressentir autre chose qu'une légère sensation de chaleur aux points d'entrée et de sortie du courant, alors que des courants *dix fois moindres* eussent été *mortels* si la fréquence avait été abaissée à cent!

L'action physiologique n'est pas nulle cependant, mais elle est plus profonde : la circulation de ces courants dans le corps augmente énormément l'activité des échanges, peut *doubler* l'absorption de l'oxygène par le sang.

On devait donc s'attendre à voir les ralentis de la nutrition, diabétiques, arthritiques, rhumatisants, obèses, retirer de l'emploi rationnel de ces courants les résultats les plus heureux ; ces résultats ont dépassé les espérances.

Une propriété fort remarquable aussi de la haute fréquence et susceptible de provoquer dans certains cas des cures merveilleuses est de faire varier à volonté la pression artérielle dans un sens ou dans l'autre suivant la nature des applications. L'apoplexie foudroyante, les ruptures d'anévrismes, épées de Damoclès toujours suspendues sur la tête des personnes à pression artérielle trop élevée, verraient de ce fait diminuer beaucoup le nombre de leurs victimes.

D'ailleurs, les travaux qui se poursuivent de tous côtés sur cet intéressant sujet démontrent que le traitement de bien d'autres affections peut bénéficier de l'application de la haute fréquence : le terrible tueur d'hommes lui-même, le microbe de la tuberculose, perd du terrain devant elle et, sous ses attaques répétées, le virus qu'il sécrète paraît s'atténuer.

Effets d'induction. — En raison de leurs variations incomparablement rapides, les courants à haute fréquence devaient se prêter à l'obtention d'effets d'induction très intenses.

C'est ce qui se produit en effet.

La figure 173 reproduit le dispositif adopté par M. d'Arsonval pour les applications médicales de la haute fréquence. On y voit figuré le solénoïde qui constitue la self-induction du circuit oscillant, self-induction qui doit être faible pour que les oscillations soient rapides, et que quelques tours de gros fil suffisent à constituer. Entourons ce solénoïde d'*une seule* spire de fil en cuivre *complètement isolée dans l'espace* et dont les extrémités aboutissent aux bornes d'une lampe à incandescence : la lampe s'allume! C'est que les variations de champ qui se produisent à l'intérieur du solénoïde et, par suite, à

l'intérieur de la spire, sont d'une rapidité si énorme que la f. é. m. induite dans celle-ci est suffisante pour alimenter la lampe.

Nous pouvons constater ici une chose fort curieuse.

Mettons un noyau de fer dans notre solénoïde : les effets constatés

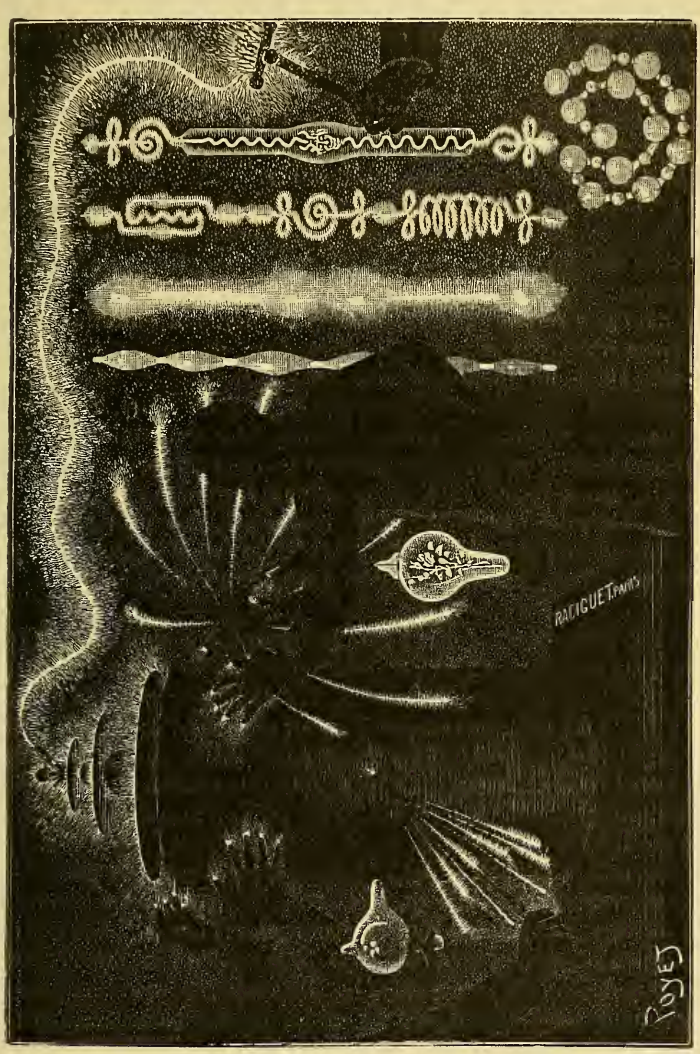


Fig. 174. — Effets lumineux de la haute fréquence.

ne s'en augmentent pas comme vous auriez pu le supposer. Pour ces fréquences, en effet, le fer est comme les animaux, l'inertie de ses molécules est trop grande, elles semblent n'avoir pas le temps de vibrer à une pareille allure et ses propriétés magnétiques sont totalement annihilées.

Ces effets d'induction énormes sur des circuits très simples sont susceptibles de se manifester sous une forme particulièrement remarquable, en provoquant des courants induits très intenses dans l'organisme même des personnes, des malades qui y sont soumis, placés, pour ce faire, à l'intérieur des grands solénoïdes combinés pour cet usage. Les courants induits fabriqués dans le corps sont alors si intenses qu'ils peuvent, avec des appareils très puissants déterminer l'incandescence d'une lampe de plusieurs bougies dont le patient tient dans la main les deux terminaux ! C'est la belle méthode de l'*autoconduction*, à propos de laquelle le nom de M. d'Arsonval doit revenir une fois de plus.

Les tensions obtenues dans le montage du Dr d'Arsonval sont naturellement du même ordre que celles de la bobine génératrice, c'est-à-dire très élevées. Elles sont, de ce fait, susceptibles de produire des phénomènes d'une autre catégorie, effluves violettes intenses provoquant une rapide *ozonisation* de l'air ambiant, illumination de tubes vides d'air par simple approche d'un des pôles du résonateur, etc. Dans de mémorables expériences faites en 1891 devant l'Association des Ingénieurs électriciens des États-Unis, Tesla avait donné un éclat remarquable à ces phénomènes en employant, pour relever la tension de son générateur à haute fréquence, un circuit induit d'un assez grand nombre de spires. Dans ces conditions, les tubes de Geissler prenaient, par leur éclat, les proportions de véritables sources de lumière (*fig.* 174), et le jeune ingénieur voyait dans ces superbes illuminations l'éclairage de l'avenir.

Dans ces expériences sur la haute fréquence, une chose paraît toujours fort surprenante aux non-initiés, parce qu'elle paraît en contradiction complète avec les lois ordinaires de l'électricité ; le contact avec *un seul pôle* suffit pour provoquer les effluves, l'illumination des tubes de Geissler, voire même l'allumage de lampes à incandescence. La contradiction est plus apparente que réelle. L'objet touché présente toujours, par rapport à l'autre pôle, une certaine *capacite* dont l'air interposé constitue le diélectrique, et, grâce à l'énorme fréquence, cette capacité, si petite soit-elle, est suffisante pour véhiculer le courant susceptible de tels effets (v. p. 292). La notion du circuit électrique n'en est donc pas ébranlée pour si peu, et il se trouve tout simplement que, par suite de la rapidité des oscillations, les corps isolants interposés entre les deux corps peuvent se présenter nettement sous cet aspect de corps *conducteurs* spéciaux que nous leur avons reconnu. Les superbes expériences de Hertz et la télégraphie sans fils, dont nous reparlerons (p. 377), ne seront que l'application poussée à l'extrême de ce même phénomène.

Citons encore un autre phénomène.

L'expérience qui le met en évidence consiste à brancher une lampe à incandescence sur *quelques spires* du solénoïde à haute fréquence : la lampe s'allume, et c'est bien cela qui est étonnant.

Car la résistance de quelques spires de gros fil en question n'est qu'une très petite fraction d'ohm ; les courants qui les traversent sont aussi assez faibles, soit quelques ampères au plus : par conséquent, leur passage, s'ils se comportaient comme des courants ordinaires, ne devrait provoquer entre les deux points de dérivation qu'une diff. de pot. de quelques millivolts. Pourtant la lampe y trouve les 50 volts et plus qui lui sont nécessaires !

Ceci provient naturellement en grande partie de ce que la self-induction des spires, combinée à l'énorme rapidité des variations, augmente d'une façon démesurée leur résistance apparente ; mais un autre effet se superpose à celui-là. Aux fréquences élevées, la propagation des courants dans les conducteurs ne se fait qu'à *leur surface*, dans une couche d'autant plus mince que la fréquence est plus élevée : ainsi la presque totalité du métal est inutilisée comme conducteur, et non seulement la résistance apparente des spires, mais leur résistance ohmique elle-même se trouve énormément accrue.

Par exemple, j'ai effectué quelques mesures avec un courant de 1 million d'oscillations par seconde sur une barre de fer de 1 mètre de long et 4 centimètres de diamètre. Cette barre présentait au courant une résistance apparente de 2,5 ohms, *vingt-cinq mille fois plus grande* que celle qu'elle aurait présentée au courant continu !

Meuble Gaiffe. — Il m'est impossible de terminer ce chapitre sans ajouter que MM. d'Arsonval et Gaiffe ont combiné en ces derniers temps un ensemble remarquable, véritable petite usine portative pour la production directe de la haute tension, de la haute fréquence et de toutes leurs applications (radiographie, applications médicales, télégraphie sans fils, etc.). Cet appareil se branche directement sur les distributions de courant continu ou alternatif ; il permet d'éviter la sujétion de cet instrument somme toute assez irrationnel et incommode qu'est la bobine de Ruhmkorff, tout en donnant lieu à des effets très facilement réglables depuis zéro jusqu'à l'intensité la plus extraordinaire.

Les courants alternatifs fournis par le transformateur à haute tension (v. p. 271) qui forme la partie essentielle de l'appareil étant impropres, comme nous le verrons, à la production des rayons X (v. p. 391), doivent être, pour cette application spéciale, transformés en courant de même sens. L'appareil est disposé de telle façon que ce résultat est atteint très joliment à l'aide des *soupapes* de *Villard*, curieux tubes de Geissler (v. p. 394) qui, par suite d'une différence de forme et de nature des deux électrodes, se laissent traverser dans un sens mais pas dans l'autre par la décharge électrique.

COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE VINGT-QUATRIÈME

COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES

REPRÉSENTATION HYDRAULIQUE

Depuis pas mal de pages déjà, nous nageons dans les eaux troubles des courants variables. Il est temps maintenant d'aborder une classe de ces courants qui présente, en pratique, une importance considérable. Je veux parler des *courants alternatifs*.

Que sont les courants alternatifs ?

Ce sont des courants provoqués par des f. é. m. qui, au lieu d'être *constantes* comme celles produites par les piles, passent alternativement par des valeurs *positives*, puis *négatives* et ainsi de suite.

Voilà sans doute une définition qui ne vous dit rien qui vaille ?

Appelons l'hydraulique à notre secours (*fig.* 175).

Reprenons notre ensemble de deux vases A et B réunis par un tuyau flexible T ; supposons que A, au lieu d'être fixe, soit suspendu par une ficelle à l'aide de laquelle vous allez alternativement l'élever au-dessus, puis l'abaisser au-dessous de B et ainsi de suite. Quand A sera au-dessus de B, nous dirons que la différence de niveau agissante est *positive*, tandis qu'elle sera *négative* lorsque A sera au-dessous de B ; et nous expri-

merons ces variations en disant que la diff. de niveau de A à B est *alternative*.

Comme conséquence de ces variations de la différence de niveau, on voit que T est parcouru par un courant liquide qui, au lieu d'aller toujours dans le même sens, comme c'était le cas du courant liquide continu, va *alternativement* de A vers B, puis de B vers A : ce courant liquide est donc *alternatif* comme la diff. de niveau qui le produit.

Diff. de niveau et courant liquide alternatifs, ainsi rendus visibles, sont l'image des *diff. de pot. et des courants électriques alternatifs;* ceux-ci, d'ailleurs, ne sont pas tout à fait

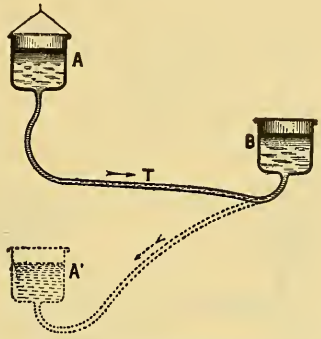


Fig. 175. — Représentation hydraulique du courant alternatif.

des inconnus pour vous : les oscillations électriques, qui vous étonnaient si fort et avec lesquelles maintenant vous êtes familiarisé, ne sont pas autre chose.

En pratique, toutefois, on réserve le nom de courants alternatifs à ceux qui sont produits par des diff. de pot. alternatives dont les variations suivent une loi que nous allons indiquer. Dans notre explication précédente, nous avons supposé que nous balancions le vase A à la main. Nous lui faisions prendre dans ces conditions un mouvement quelconque qui pouvait être, sans rime ni raison, lent à un moment, rapide à un autre, etc. Les courants alternatifs proprement dits ne s'accommodent pas de ces variations fantaisistes ; ne sont jugés dignes de ce nom que ceux qui sont produits par une diff. de pot. dont les variations suivent une loi constante, qui est celle des oscillations d'un pendule.

Mais tranquillisez-vous. Notre guide accoutumé ne nous abandonnera pas pour si peu.

Il nous est facile, en effet, de faire suivre cette même loi aux variations de la diff. de niveau de A par rapport à B. Il suffit de suspendre A à un ressort à boudin assez long et assez flexible pour que, en tirant sur ce ressort pour abaisser A, puis lâchant celui-ci, A prenne un mouvement vertical d'oscillation entre deux positions extrêmes A_1, A'_1, telle que la plus grande diff. de niveau positive soit égale à la plus grande diff. de niveau négative. Nous supposons naturellement que le mouvement de notre système se continue indéfiniment, rien ne

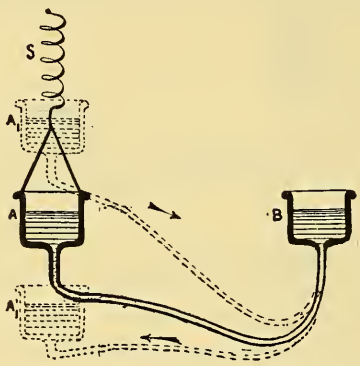


Fig. 176. — Représentation du courant alternatif ordinaire.

nous empêchant d'admettre que ce système reçoit périodiquement des impulsions destinées à empêcher son mouvement de s'affaiblir[1].

Dans ces conditions, nous réalisons une différence de niveau variable qui, d'abord nulle, prend des valeurs positives croissantes jusqu'à une certaine valeur maxima A_1 où le vase cesse de monter et à partir de laquelle elle diminue; qui, ensuite, s'annule en repassant par son point de départ, change de signe pour prendre des valeurs *négatives* croissantes jusqu'à un certain minimum correspondant à la position A'_1, minimum égal et de sens contraire au maximum précédent, puis

1. Électriquement, ce sera la dynamo à courant alternatif, ou *alternateur*, qui se chargera de donner à la diff. de pot. alternative les impulsions périodiques.

diminue et s'annule de nouveau en repassant à son point de départ A, après avoir parcouru alors un cycle complet qu'on appelle une *période ;* et ainsi de suite.

Remarquons en passant que nous savons réaliser une différence de potentiel électrique suivant exactement le même cycle de variations que notre différence de niveau alternative : nous avons vu, en effet (p. 214), qu'une spire de fil tournant à vitesse constante autour de son axe dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire à cet axe nous la fournit précisément (*fig.* 177). Faible diff. de pot. à la vérité, et que nous

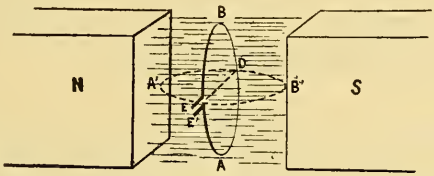


Fig. 177. — Production d'une f. é. m. alternative.

verrons tout à l'heure à amplifier, mais il nous suffit pour l'instant de savoir en réaliser une de cette nature.

F. É. M. ALTERNATIVE SUR RÉSISTANCE SANS SELF

Notre point de départ établi, étudions d'abord l'allure du courant liquide quand le tuyau qui réunit A et B est fin et long et correspond par suite, électriquement, à une grande résistance dépourvue de self-induction (*fig.* 176).

Supposons que, A et B étant au même niveau, on élève A.

Par suite de la diff. de niveau croissante créée entre A et B, le liquide se met *aussitôt* en mouvement, puisque nous négligeons son inertie : il y a production dans T d'un courant allant vers B et qui augmente évidemment à chaque instant avec la différence de niveau.

Le maximum d'intensité du courant liquide correspond nécessairement au moment où le vase arrive au haut de sa course, en A_1.

Réciproquement, lorsque A descend, la pression diminuant, le courant de A vers B va aussi en diminuant jusqu'au moment où, A étant revenu au niveau de B, il s'annule.

Pendant la seconde moitié de la période, partie pendant laquelle les diff. de niveau seront négatives, puisque A sera au-dessous de B, les choses se passeront d'une manière analogue, le courant, toutefois, s'étant *inversé*, allant maintenant de B vers A et pouvant dès lors être considéré, lui aussi, comme *négatif ;* comme lors de la première moitié de la période, ce courant négatif atteindra son maximum lorsque A sera en A'_1, au plus bas de sa course, et s'annulera lorsque A sera revenu à son point de départ.

Pas la moindre difficulté dans tout ceci.

Concluons :

Quand l'inertie est négligeable, l'intensité du courant liquide suit exactement les variations de la différence du niveau, est maxima ou minima, s'annule et change de sens *en même temps qu'elle* ; la différence de niveau et le courant sont, comme on dit, en *concordance de phases*, toutes les phases de leurs variations se produisant ensemble.

Le cas que nous venons d'étudier correspond électriquement au cas où une différence de potentiel alternative agit sur un circuit constitué uniquement par de la résistance sans self-induction ni capacité.

Nous en conclurons par analogie, et c'est ainsi que les choses se passent en réalité, que, dans ce cas, l'intensité du courant suit exactement toutes les fluctuations de la diff. de pot., est en *concordance de phases* avec elle.

Nous voyons de plus que, dans le phénomène hydraulique, comme nous supposons l'inertie entièrement négligeable, le courant liquide, *à un instant donné*, prend exactement la même valeur que si la différence de niveau agissant en ce moment se maintenait d'une façon permanente à cette valeur, était constante. Ceci signifie, électriquement parlant, d'abord que, dans un tel circuit, le courant prend immédiatement son régime normal, qui n'est précédé d'aucune période appréciable d'établissement de courant; ensuite, que la loi de Ohm peut être appliquée ici, l'intensité du courant *à chaque instant* étant égale

au quotient de la différence de potentiel *agissant à cet instant* par la résistance ohmique du circuit.

Notez, en passant, ce petit succès de la loi de Ohm en matière de courants alternatifs.

Vous pourrez compter les autres !

MESURE DES COURANTS ALTERNATIFS

Ceci nous amène tout naturellement à ouvrir une parenthèse et à voir comment se présente la mesure des courants alternatifs.

Nous venons de remarquer qu'à la condition de considérer *à un instant donné* un circuit soumis à une diff. de pot. alternative, il est possible d'y voir une diff. de pot. et un courant se comportant l'un vis-à-vis de l'autre comme s'il s'agissait de courant continu. Dans la mesure de ces deux éléments instantanés, nous n'aurons donc aucune hésitation à employer, comme pour le courant continu, le *volt*, l'*ampère* et l'*ohm;* nous n'éprouverons pas plus de difficulté à admettre *qu'à cet instant* la puissance développée était de tant de *watts*, le nombre de watts étant précisément égal au produit des volts par les ampères à ce moment.

Donc, en ce qui concerne les valeurs *instantanées* du courant, rien de plus simple, même si ces éléments, à l'instant considéré, sont en tout ou en partie négatifs ; on dira, par exemple, qu'à un moment donné, la f. é. m. agissante est de — 30 volts, déterminant un courant de — 20 ampères (d'où $R = 1{,}5$ ohm).

Mais où les choses s'embrouillent, c'est que, à part la résistance du circuit, qui n'a pas de raison de changer, ces volts et ces ampères subissent des variations perpétuelles, passant périodiquement par toutes les valeurs comprises entre la f. é. m. et le courant maxima, + 50 volts et + 30 ampères, par exemple, et la f. é. m. et le courant minima, — 50 volts et — 30 ampères.

Ces variations continuelles des divers éléments des courants

alternatifs peuvent, à bon droit, vous faire redouter une grande complexité dans leur mesure.

Heureusement, cette crainte n'est pas absolument justifiée, car nous allons voir que les courants alternatifs peuvent produire *certaines* actions identiques à celle du courant continu ; ceci nous permettra, en effet, d'arriver à mesurer les courants alternatifs par *comparaison* avec les courants continus susceptibles de produire les mêmes effets.

Ainsi, lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant, il s'échauffe, et peu lui importe pour cela le *sens* du courant. De même qu'une f. é. m. continue, une f. é. m. alternative peut donc provoquer un courant capable de porter à l'incandescence le filament d'une lampe si les *alternances* (c'est-à-dire les *lancées* de courant qui se succèdent dans un sens et dans l'autre à raison de *deux par période*) se succèdent assez vite pour que le filament, grâce à son inertie calorifique, n'ait pas le temps de se refroidir beaucoup aux instants où le courant s'annule. La f. é. m. alternative sera équivalente à la f. é. m. continue si, avec l'une ou avec l'autre, le filament est poussé au même degré d'incandescence[1].

Diff. de pot. efficace (E *eff*). — Par exemple, l'application de ce procédé de comparaison montre qu'une f. é. m. alternative présentant une valeur maxima de 141 volts et toute la gamme des valeurs intermédiaires entre + 141 et — 141, en passant par 0, ne produit que les effets d'une diff. de pot. constante naturellement *plus faible* que 141 volts, et qui serait de 100 volts seulement : on dit que la f. é. m. *efficace* de cette diff. de pot. alternative est de 100 volts.

Ce rapport de $\frac{141}{100} = 1,41$ entre la f. é. m. maxima et la f. é. m. efficace correspondante d'un courant alternatif n'est pas quelconque : il est absolument *constant* et a comme particularité d'être égal à $\sqrt{2}$.

---

1. Les explications qui seront données plus loin montrent que ceci n'est vrai qu'autant que la comparaison est effectuée à l'aide d'une résistance ne présentant pas de self-induction, ce qui est sensiblement le cas pour le filament des lampes à incandescence.

Il serait peut-être téméraire de tenter ici d'expliquer pourquoi.

Courant efficace (*I eff*). — Des considérations analogues expliqueraient l'expression d'intensité *efficace;* ainsi, une intensité efficace de 1 ampère représente un courant alternatif qui, traversant une lampe à incandescence, y produirait le même éclat qu'une intensité continue de 1 ampère. A ce courant *efficace* de 1 ampère correspond nécessairement une intensité *maxima* plus grande ; comme tout à l'heure pour les f. é. m., le rapport entre l'intensité maxima et l'intensité efficace correspondante est encore constant et égal à $\sqrt{2}$ ou 1,41, de sorte qu'un courant alternatif possédant une intensité *efficace* de 10 ampères présente à chaque période des *maxima* de + 14,1 et — 14, 1 ampères.

Ajoutons que quand on parle en pratique de volts et d'ampères alternatifs, c'est toujours de volts et d'ampères *efficaces* qu'il s'agit, à moins que le contraire ne soit explicitement spécifié.

Quant à la puissance, nous la retrouverons tout à l'heure. Bornons-nous, pour l'instant, à nous rappeler ce fait essentiel, que la puissance à *chaque instant* ou *instantanée* développée par un courant quelconque est égale au produit du courant à cet instant par la diff. de pot. à ce même instant.

F. E. M. ALTERNATIVE SUR SELF-INDUCTION

Nous avons supposé tout à l'heure que notre f. é. m. alternative avait trouvé, pour se livrer à ses exercices, un circuit conducteur tout à fait exempt de self-induction : c'était une supposition purement gratuite.

Qui dit courant dans un conducteur dit, en effet, champ magnétique créé par ce courant (p. 160) et, par conséquent, self-induction — sauf précautions spéciales.

Du reste, l'analogie hydraulique correspondante était aussi un pur produit de notre imagination, car il est impossible que le liquide d'un tuyau ne présente pas une certaine inertie.

Ces invraisemblances, d'ailleurs, ne tiraient pas à conséquence, car si, au lieu de supposer qu'il n'y a *pas du tout* de self-induction ou d'inertie, on suppose simplement qu'il n'y en a *pas beaucoup* par rapport aux frottements, les résultats restent les mêmes.

Mais admettons maintenant qu'il y en a *énormément*, et que les frottements sont, au contraire, très petits. Nous allons voir quelles modifications profondes vont en résulter dans l'allure du courant.

Un tel ensemble pourra se représenter par notre vase oscillant A, relié à B à l'aide d'un tuyau *gros et long* (*fig.* 178).

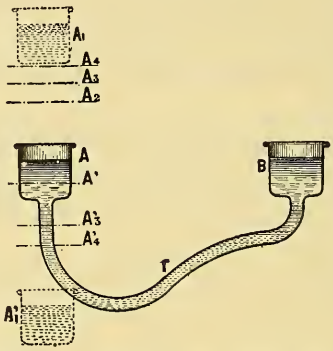


Fig. 178. — Représentation hydraulique d'une f. é. m. alternative agissant sur une self-induction.

Prenons ce système au moment où le vase oscillant se met en route vers le haut à partir de sa position de repos A.

Si nous considérons une position quelconque de A pendant sa montée, par exemple A_2, le liquide, en vertu de son inertie, *n'a pas encore eu le temps* de prendre la vitesse qui correspondrait à cette position si le vase y restait indéfiniment. Le courant est donc *en retard* sur la diff. de niveau, et cela d'autant plus que la rapidité du mouvement de A est plus grande.

En particulier, lorsque A est arrivé au haut de sa course, en A_1, le liquide n'a encore eu le temps d'acquérir que la vitesse qui correspondrait à une position permanente *notablement inférieure*, A_3 par exemple.

Donc, lorsque le vase va redescendre, bien que la diff. de niveau agissante *diminue*, vous concevez très bien que *le cou-*

rant n'en continuera pas moins à augmenter, jusqu'à ce que le vase, en descendant, ait atteint une certaine position A_4, comprise entre A_3 et A_1, et à laquelle le courant possède précisément la valeur qu'il aurait si le récipient se fixait en ce point.

A partir de ce moment, le courant ne pourra plus que diminuer, de sorte que la position A_4 est celle du maximum du courant et que ce maximum, au lieu de se produire en même temps que celui de la diff. de niveau, se produit après lui, est *en retard.*

Poursuivons :

Le vase, continuant à descendre, atteint son niveau primitif A.

A ce moment, le liquide est encore animé d'un mouvement assez rapide de A vers B. Comme, en vertu de son inertie, il ne peut s'arrêter brusquement, et quoique la diff. de niveau devienne *négative*, il continue à aller de A vers B, restant *positif*, et ne s'annule, pour changer de sens et devenir négatif à son tour, qu'en A′, après le passage en A.

Ainsi, chose curieuse, entre A et A′, diff. de niveau et courant sont de *sens contraires.*

Mais poursuivons encore :

Le vase arrive à la partie inférieure de sa course, en A'_1 : en cet endroit, le courant liquide, qui ne se dirige de B vers A que depuis A′, n'a pas eu le temps de prendre à ce moment une valeur aussi grande que le courant de A vers B pour la position opposée A_1, lequel avait eu tout le temps du trajet de A à A_1 pour s'accroître. Ce courant, pour la position A'_1, n'a donc que la valeur qui correspondrait à la position supposée constante A'_3, plus éloignée de la position extrême A'_1 que A_3 ne l'était de A_1. Et, comme conséquence, lorsque le vase remonte, le courant de B vers A continue à *augmenter* jusqu'à une position A'_4 comprise entre A'_1 et A'_3, mais plus éloignée de A'_1 que A_4 ne l'était de A_1.

Ainsi, le second maximum du courant, maximum négatif, se produit encore *après* le maximum négatif de la diff. de pot., mais le retard *s'est augmenté.*

On conçoit que, si on continuait le même ennuyeux raisonnement — qui ne m'amuse pas plus que vous, je vous prie

de le croire ! — on arriverait à trouver que ce retard du courant sur la différence de niveau qui le produit, ce *décalage en arrière*, comme on dit, va en augmentant pendant un certain nombre de périodes. On conçoit aussi qu'il sera d'autant plus grand que la rapidité du mouvement sera plus grande et l'inertie plus forte.

Toutefois, tout ce que ce retard peut faire, c'est d'atteindre *un quart de période*, auquel cas le courant *s'annule* lorsque la diff. de pot. est *maxima* et inversement.

Car il est évident que, par exemple, le courant vers B qui existe au moment où le vase passe en A *en descendant* ne peut s'augmenter après ce passage, puisque la diff. de pot., *négative* à partir de ce moment, agit sur lui à *contre-sens :* donc la valeur du courant à ce moment ou bien est un maximum, ou bien a déjà commencé à diminuer, de sorte que forcément l'endroit du maximum du courant est situé dans le quart de période compris entre A_1 et A, et que le retard sur la position A_1 du maximum de diff. de niveau est *au plus* d'un quart de période. On raisonnerait de la même façon à la remontée du vase A.

Notre raisonnement nous montre en outre ce fait intéressant que l'intensité du courant liquide, au lieu de prendre des valeurs maxima en rapport avec la plus grande différence de niveau agissante, n'atteint que des maxima correspondant au niveau A_4, par exemple, au lieu de A_1, — et, par suite, possède toujours, de par l'inertie, une valeur efficace *plus petite ; énormément plus petite*, même, si l'inertie est très grande et les oscillations de A très rapides.

L'inertie semble donc *augmenter la résistance* opposée aux déplacements du liquide, et cela, non seulement pour une période d'établissement très courte, comme nous avons vu que c'était le cas lorsqu'il s'agissait d'une diff. de niveau constante (Voir p. 253), mais d'une manière *permanente*.

Le raisonnement précédent était ennuyeux, certes, je n'ai fait aucune difficulté pour l'avouer, mais convenez que sans lui, il vous serait difficile de deviner que l'adjonction de la self-induction dans un circuit a pour effet :

1° De faire précéder le régime normal du courant d'une

période d'établissement dans laquelle ce régime normal s'établit petit à petit, ce qui n'était pas le cas (p. 308) avec le circuit sans self ;

2° D'augmenter d'une manière permanente la *résistance apparente* du circuit, et cela d'autant plus que la self-induction et la fréquence sont plus grandes ;

3° De supprimer la simultanéité entre les maxima et les annulations de la f. é. m. et du courant, en produisant un *décalage en arrière* du courant par rapport à la f. é. m. : ce décalage, cette *différence de phases* est d'autant plus grande que la fréquence et la self-induction sont *plus grandes* et la résistance *plus faible*. Sa valeur limite est d'*un quart de période*, la f. é. m. étant alors maxima quand le courant est nul et inversement.

Le phénomène d'augmentation de la résistance apparente présente une importance dont on se fera une idée quand on saura qu'avec les courants alternatifs usuels, dont la fréquence est de 25 à 100 périodes par seconde — combien peu, cependant, par rapport aux hautes fréquences déjà étudiées ! — le fil d'une bobine enroulée sur un noyau de fer peut présenter une résistance apparente 20, 50, 100 fois plus grande que sa résistance *ohmique !*

Ainsi, une bobine à noyau de fer feuilleté enroulée d'un fil de 1 ohm de résistance, placée sur une diff. de pot. alternative de 100 volts efficaces, pourra n'être traversée que par un courant efficace de 1 ampère, insuffisant pour l'échauffer. Qu'on vienne alors à retirer le noyau et que, par suite, on annule presque la self-induction, et l'intensité augmentera à tel point que le fil sera fondu !

Quant aux effets du *décalage*, ils ne présentent pas une moindre importance. Nous allons voir ce que devient, grâce à lui, la puissance absorbée dans le circuit.

PUISSANCE APPARENTE, PUISSANCE RÉELLE

Au point de vue de la puissance demandée au générateur, les circuits comportant de la self-induction et traversés par des courants alternatifs se comportent en effet de très singulière façon.

Nous avons insisté tout à l'heure (p. 311) sur cette règle fondamentale de l'électricité que, quelle que soit l'allure du courant, la puissance mise en jeu *à un instant donné* dans un circuit est égale au produit de la diff. de pot. aux bornes à cet instant par le courant correspondant.

Mais notre étude des circuits alternatifs à self-induction vient de nous montrer que, suivant les cas, ce courant correspondant pouvait aussi bien être dirigé *en sens contraire* de la diff. de pot. agissante que dans le même sens (p. 313).

Bien que, d'après la loi en question, la puissance qui apparaît dans ces deux cas soit la même si les diff. de pot. sont égales et les courants égaux, vous sentez bien, cependant, qu'il doit y avoir entre eux une différence.

Dans le cas du courant *de même sens* que la diff. de pot., il n'y a pas d'hésitation : l'exemple du courant continu montre qu'ici il s'agit d'une puissance qui doit être effectivement *développée* par le générateur pour entretenir le courant.

Si, au contraire, le courant est de *sens contraire* à la diff. de pot., il développe sa puissance *contre* celle-ci : nous nous trouvons ici en présence d'un fait analogue à celui du courant de charge d'un accumulateur, luttant *contre* la f. c. é. m. E' de celui-ci (p. 140) ; ou encore à celui du courant d'alimentation d'un moteur électrique, qui doit aussi vaincre la f. c. é. m. E' du moteur pour l'alimenter (p. 225) ; et nous savons que, dans un cas comme dans l'autre, le courant *cède* à l'accumulateur ou au moteur une puissance $E'I$.

Ici, c'est la même chose.

La puissance développée par le courant *contre* la diff. de pot. créée par la source de courant alternatif chaque fois qu'il est de *sens contraire* à cette diff. de pot. est de la puissance *restituée* au générateur, tandis que la puissance développée par le courant lorsqu'il est de *même sens* que la diff. de pot. est de la puissance effectivement *produite* par le générateur, effectivement *fournie* à notre circuit.

Et, comme puissance *restituée* ne va pas sans puissance *emmagasinée* préalablement, vous vous doutez bien que c'est la self-induction — n'oublions pas que nous parlons d'un circuit à grande self-induction — qui se charge de faire cet emmaga-

sinement nécessaire, sous forme de champ magnétique, dans les parties de la période où le courant est de même sens que la diff. de pot., et où de la puissance est donc réellement fournie par la source.

Un simple rappel de l'analyse que nous avons faite tout à l'heure confirmera cette explication en faisant voir que le courant ne peut *augmenter* — dans un sens ou dans l'autre — que s'il est de *même sens* que la diff. de pot., ce qui est évident, car il ne pourrait augmenter si celle-ci agissait à *rebours:* le champ, qui se crée précisément pendant que le courant augmente, *ne peut donc se former* que pendant les périodes où

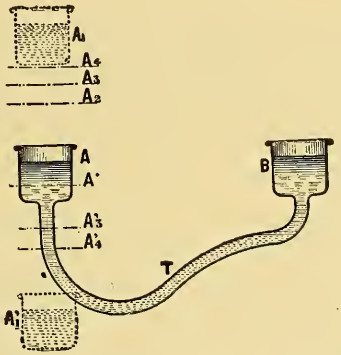


Fig. 179. — Mécanisme des absorptions et des restitutions de puissance.

de l'énergie est *demandée* à la source, énergie dont il emmagasine une partie.

Au contraire, la même analyse montre bien que le courant ne peut être de *sens contraire* à la diff. de pot., c'est-à-dire ne peut restituer de l'énergie que lorsqu'il *diminue*, ce qui est évident puisque la diff. de pot. agit alors sur lui à contre-sens ; le champ disparaissant alors *restitue* son énergie sous forme d'une force contre-électromotrice de self-induction qui surmonte la f. é. m. du générateur, puisque le courant va à ce moment à l'encontre de celle-ci, et vis-à-vis de laquelle le générateur travaille un instant comme *moteur*.

Lorsqu'il n'y a que de la résistance sans self dans le circuit, il ne peut y avoir d'emmagasinement ni, par suite, de restitution : c'est pourquoi nous avons vu que, dans ce cas, le cou-

rant et la diff. de pot. sont toujours de *même sens* (p. 308), montrant que toujours de la puissance est *demandée* au générateur et disparaît à mesure sous forme de chaleur dans la résistance.

Lorsque, au contraire, la self est grande, la résistance nulle, nous avons vu qu'il y a un décalage en arrière d'un quart de période, le courant s'annulant quand la diff. de pot. est maxima et inversement : ce courant reste donc de sens contraire à la diff. de pot. pendant tout le premier quart de période pour devenir de même sens pendant tout le second quart et ainsi de suite. Les périodes d'absorption et de restitution sont égales entre elles, la puissance restituée est égale à la puissance absorbée.

On arrive donc ici à cette conclusion paradoxale en apparence, que, bien que le système puisse être alors soumis à des diff. de pot. considérables et à des courants intenses, il fonctionne avec une *puissance moyenne nulle*, puisque tout ce qui est demandé au générateur à un instant lui est intégralement rendu l'instant d'après. Et, si étonnant qu'il paraisse, ce résultat n'en est pas moins en complet accord avec la logique, car la résistance du circuit étant supposée nulle, aucune énergie ne peut s'y dépenser en chaleur : il y a seulement, répétons-le, de l'énergie emmagasinée à la création du champ et restituée intégralement à sa disparition.

Si le circuit comporte à la fois résistance et self-induction, le décalage ne peut plus atteindre le quart de période, de sorte que le courant n'est plus opposé à la diff. de pot. *aussi longtemps* qu'il est de même sens : par suite, la puissance absorbée est *plus grande* que la puissance restituée. En effet, la puissance cédée par le générateur a ici à fournir à la fois ce qui est emmagasiné dans le champ et ce qui disparaît en chaleur. Cette dernière partie est définitivement perdue au point de vue électrique, la première seule est restituée lorsque le courant diminue.

Ceci nous amène à faire une distinction absolument essentielle en matière de courants alternatifs. Il faut distinguer entre la *puissance apparente* fournie à un circuit par un alternateur et la *puissance réelle* fournie à ce circuit.

Par exemple, dans un circuit exclusivement constitué par

une self-induction, nous pouvons avoir à la fois grandes diff. de pot. efficaces et grands courants efficaces. Si nous nous avisions d'évaluer la puissance débitée par l'alternateur sur ce circuit en faisant le produit des indications du voltmètre à courant alternatif placé entre les bornes, qui indique les volts efficaces, et de l'ampèremètre placé dans le circuit, qui indique les ampères efficaces, nous trouverions que l'alternateur débite une puissance *énorme*.

Ceci, pourtant, ne serait qu'une apparence.

D'abord, par suite du décalage, une grande diff. de pot. ne peut exister *au même instant* qu'un grand courant dans un tel circuit, puisque l'un s'annule quand l'autre est maximum : donc, à aucun moment, la puissance ne peut être aussi grande qu'on pourrait le croire ; en outre, et surtout, nous savons que la puissance qui est demandée à certains moments est restituée à d'autres, de sorte que la puissance moyenne dépensée par l'alternateur est très faible.

Conclusion :

Contrairement à ce qui est vrai pour les valeurs *instantanées* du courant et de la diff. de pot. (p. 309), il est faux d'évaluer la puissance fournie à un circuit ou débitée par un alternateur en faisant le produit de l'intensité efficace par la diff. de pot. efficace. On n'a ainsi que la *puissance apparente*.

Pour avoir la *puissance réelle*, il faut tenir compte du décalage et multiplier le produit *E eff. I eff.* par ce qu'on appelle le *facteur de puissance*, qui, égal à l'unité si le circuit n'est pas inductif (cas des résistances sans self, décalage nul), *s'annule* lorsque le circuit ne contient que de la self-induction, ou, comme nous le verrons, que de la capacité (décalage, un quart de période).

Il n'y a, en résumé, qu'un seul cas où le produit *E eff. I eff.* des indications du voltmètre à courant alternatif par l'ampèremètre à courant alternatif peut être légitimement considéré comme représentant la puissance réelle : c'est celui d'un générateur débitant sur un circuit non ou faiblement inductif, lampes à incandescence par exemple.

Dans tous les autres cas, la puissance ne peut se mesurer correctement qu'à l'aide d'instruments spéciaux qu'on appelle

des *wattmètres*, à moins qu'on ne puisse connaître le facteur de puissance correspondant au circuit considéré, 0,80 ou 0,90 par exemple, auquel cas on aura la puissance réelle en multipliant par ce facteur le produit *E eff. I eff.*

F. É. M. ALTERNATIVE SUR CAPACITÉ

Continuons notre étude des particularités des courants alternatifs et venons-en à un cas qui par lui-même ne présente rien de bien intéressant, mais qui va nous mettre sur la voie de phénomènes qui ont dérouté les électriciens pendant longtemps.

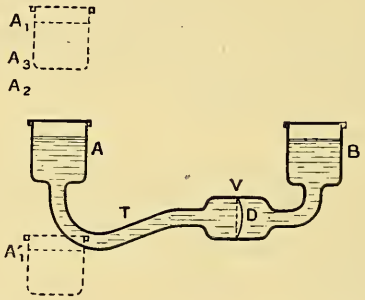


Fig. 180. — F. é. m. alternative sur capacité.

Supposons que notre circuit soit constitué en tout et pour tout par un condensateur. Soumettons-le à l'action d'une f. é. m. alternative.

Que va-t-il se passer?

Nous nous sommes bien trouvés jusqu'ici de la représentation hydraulique de la capacité que nous avons imaginée (p. 285). Conservons-la donc : le vase oscillatoire A est relié au vase V à membrane élastique D par un tuyau T assez gros, mais court, dont nous pourrons négliger tout à la fois les frottements *et l'inertie* (*fig.* 180).

Élevons d'abord A à une certaine hauteur : nous savons que nous avons gonflement de la membrane jusqu'à un état d'équilibre correspondant à la hauteur de A et, pour cela, production dans T d'un certain *courant* de charge qui diminue rapidement

et s'annule, de sorte qu'avec une diff. de niveau constante il n'y a pas de courant *permanent*.

Mais faisons maintenant osciller A de A_1 à A'_1.

Il va se produire aux oscillations successives une série de courants de charge et décharge, c'est-à-dire, en réalité, un courant alternatif *permanent*.

Appliquant ces résultats aux condensateurs, nous comprenons que si le diélectrique qui constitue l'âme de ces appareils n'est pas perméable au courant continu, il se laisse, au contraire, facilement traverser par les courants alternatifs.

Quelles sont les particularités du courant alternatif qui traverse un condensateur ?

Les deux vases étant au même niveau, élevons A. Le liquide se met en mouvement de A vers B et détermine le gonflement, la tension progressive de la membrane : l'inertie étant nulle et les frottements négligeables, cette tension suit presque exactement l'accroissement de la diff. de niveau, et l'*excès* de la pression du liquide de A sur la contre-pression du diaphragme est toujours faible ; comme c'est cet excès qui détermine seul le courant, puisqu'il n'y a pas d'inertie, ce courant ne peut jamais devenir très grand.

Lorsque A arrive vers la partie supérieure de sa course, son mouvement se ralentit, puisqu'il va s'annuler, et la contre-pression tend à rattraper la diff. de niveau : le courant diminue donc, pour s'annuler lorsque le vase arrive en A_1. Ainsi, dans ce cas, qui n'est d'ailleurs que théorique, le courant *s'annule* précisément lorsque la diff. de niveau est *maxima*.

Mais notre vase descend.

La diff. de niveau diminuant, la membrane *se dégonfle :* cela signifie que la contre-pression de la membrane l'emporte sur la pression exercée par A, de sorte que, bien que la diff. de niveau soit toujours positive et encore voisine du maximum, le courant, positif jusque-là, *change de signe* et devient *négatif*, puisqu'il va maintenant de B vers A.

Il continue ainsi jusqu'au point de départ A, où le mouvement de descente du vase est le plus rapide, puisque c'est le milieu de l'oscillation pendulaire — de même que l'endroit où la vitesse d'une balançoire est la plus grande est précisément

le milieu de sa course ; — c'est donc à ce moment que la décompression de la membrane est le plus rapide et que le courant est maximum.

Le courant atteint donc son maximum de B vers A, son *maximum négatif*, quand la diff. de niveau n'en est encore qu'à *s'annuler :* il a encore sur elle une *différence de phases* d'un quart de période, mais nous voyons bien qu'ici c'est de l'*avance*, puisque la diff. de niveau n'atteindra à son tour son maximum négatif que *bien après lui*, en A'_1.

C'est donc le contraire de ce qui se passe avec la self-induction, où le courant est toujours *en retard.*

En continuant à suivre le mouvement de A, nous verrions

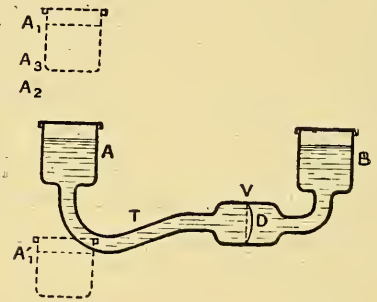


Fig. 181. — Mécanisme des absorptions et restitutions d'énergie.

aisément que cette avance d'un quart de période persiste indéfiniment.

Ceci est le cas théorique, qu'il était plus facile pour la compréhension d'étudier le premier ; mais si, au lieu d'un tube assez gros, on a un tube très fin, le gonflement et le dégonflement de la membrane, gênés par l'insuffisance du débit, ne pourront plus s'effectuer aussi rapidement que le voudraient les variations de la diff. de niveau.

En particulier, lorsque A sera au sommet de sa course, en A_1 (*fig.* 181), la tension de la membrane ne sera que celle qui correspondrait à la position supposée permanente A_2, cette position étant d'autant plus éloignée du sommet A_1 que les mouvements de A seront plus rapides. Donc, lorsque le vase redescendra de A_1, la diff. de niveau n'en continuera pas moins

pendant un certain temps à exercer une pression supérieure à la tension de la membrane ; le courant liquide continuera donc à aller vers B en comprimant la membrane et ne s'annulera que pour une position A_3 intermédiaire entre A_1 et A_2. Le courant ne s'annulera donc plus en A_1 comme tout à l'heure, mais un peu plus tard : son avance sur la diff. de niveau en sera réduite d'autant ; elle sera moindre de un quart de période, d'*autant moindre* que la résistance du tuyau et la fréquence seront *plus grandes*.

Cet examen montre encore que, si notre vase V est siège d'un courant alternatif, ce courant est toutefois moins intense que si D était supprimé, parce que, au lieu de la diff. de niveau tout entière, il n'y a que la différence à chaque instant de cette diff. de niveau et de la contre-pression de D qui détermine le courant. Quant au diaphragme D, il agit comme une résistance non plus infinie, comme il le ferait pour une diff. de niveau continue, mais d'autant plus petite que la surface du diaphragme et sa minceur sont plus grandes, c'est-à-dire que la *capacité* est plus considérable.

Vous comprendrez très bien enfin que plus les oscillations de A sont rapides (à amplitude égale), et plus intense est le courant, parce que les gonflements et dégonflements du diaphragme ont lieu en un temps plus court, de sorte que cette *résistance apparente* offerte par la capacité C *diminue* avec la fréquence.

Traduction à l'usage des électriciens :

1° Lorsqu'un condensateur est placé en série avec une résistance sur une f. é. m. alternative, le circuit est le siège d'un courant alternatif : le condensateur, au lieu de présenter une résistance *infinie*, comme ce serait le cas avec le courant continu, présente une *résistance apparente* relativement faible, *d'autant plus faible*, d'ailleurs, que la capacité et la fréquence *sont plus grandes ;*

2° La simultanéité entre les maxima et les annulations de la f. é. m. et du courant qui a lieu lorsque le circuit est constitué par une résistance parfaite, n'existe plus quand en série avec la résistance, on place un condensateur. Le courant est alors *en avance* sur la f. é. m., et cette avance ou *décalage en*

avant est d'autant plus grande que la fréquence, la résistance et la capacité sont plus petites : elle a pour limite *un quart de période.*

Une observation encore.

Nous savons que l'énergie dépensée par la charge d'un condensateur est entièrement restituée à la décharge. Se composant en somme de charges et de décharges successives, le courant alternatif de capacité ne doit donc absorber aucune puissance.

Pourtant, nous y voyons appliquée une diff. de pot. qui peut être considérable et peut provoquer des courants intenses : le produit de *I eff.* par *E eff.* paraît donc correspondre à une puissance considérable fournie par l'alternateur.

Mais ce n'est évidemment encore ici qu'une puissance *apparente* (Voir p. 319).

Effectivement, revenons à notre comparaison.

Elle nous indique que, pendant la montée de A à A_1, le courant, allant vers B pour tendre la membrane (*fig.* 181) est de même sens que la diff. de niveau et correspond à de la puissance *demandée* au générateur; tandis que, pendant la descente de A_1 à A, le courant, allant de B vers A *à l'encontre* de la diff. de niveau, correspond à de la puissance *restituée* par la détente de la membrane. Quand on néglige les frottements et l'inertie, ces deux effets sont égaux et de sens contraires, de sorte que la puissance absorbée pendant un quart de période est restituée pendant le quart suivant et que, par suite, la puissance moyenne est *nulle.*

Remplacez une fois de plus membrane par diélectrique, diff. de niveau par diff. de pot. et vous concevrez que le courant de capacité ne nécessite pas pour son entretien plus de dépense d'énergie que le courant de self-induction.

Et les phénomènes abracadabrants que je vous ai promis ? Patience, nous y arrivons !

F. É. M. ALTERNATIVE SUR SELF-INDUCTION ET CAPACITÉ EN SÉRIE

Nous savons maintenant qu'une self-induction soumise à une f. é. m. alternative est traversée par un courant *en retard*

sur la f. é. m., tandis qu'une capacité est, dans le même cas, traversée par un courant *en avance* sur la f. é. m.

Nous avons aussi remarqué que, pour une même self-induction, le courant *diminue* d'autant plus que les alternances sont plus rapides, tandis que c'est exactement le contraire pour la capacité. La self-induction et la capacité se présentent donc comme jouissant, au point de vue du courant alternatif, de propriétés exactement contraires, et nous sommes assez naturellement amenés à nous demander ce qui adviendra si, dans un seul circuit, nous combinons à la fois self-induction et capacité.

Constituons la représentation hydraulique d'un circuit comprenant capacité et self *en série*. Relions le vase A au vase à

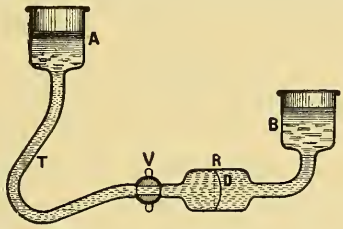


Fig. 182. — Explication du phénomène de résonance.

diaphragme D par un tuyau T ; mais, au lieu que ce tuyau soit court, comme dans l'exemple de la page 320, supposons-le *gros* et *long :* le liquide qu'il contient présente une inertie considérable, équivalant à une grande self-induction.

Supposons pour un instant A placé dans la position invariable représentée par la figure : ouvrons brusquement le robinet V. Nous savons, pour avoir étudié ce cas (p. 292), que le liquide du système prend un mouvement *oscillatoire* décroissant dont la rapidité dépend des conditions particulières, longueur du tuyau, grosseur, grandeur du diaphragme, etc. En d'autres termes, à un ensemble ATD donné, correspond une *période propre d'oscillation* rigoureusement déterminée

Pendant que le liquide effectue ses oscillations, imprimons à notre vase A, *en concordance* avec elles, un mouvement pendulaire de haut en bas.

Alors, de même qu'une personne qui se balance augmente

graduellement l'amplitude de ses oscillations en élevant et abaissant alternativement son corps *en concordance* avec le mouvement de la balançoire, de même l'amplitude du mouvement du liquide va augmenter graduellement, les oscillations vont s'amplifier de plus en plus, jusqu'à faire *crever le diaphragme* si la concordance entre le mouvement de haut en bas du vase A et le mouvement oscillatoire du système ATD est parfaite.

On dit alors qu'il y a *résonance.*

Si, au contraire, cette concordance n'existe pas, si le mouvement de haut en bas est ou plus lent ou plus rapide, les deux mouvements se contrarient et l'amplitude des oscillations reste très faible, de même qu'une personne qui chercherait à se balancer en élevant et abaissant son corps de n'importe quelle façon n'y parviendrait jamais.

Nous arrivons donc à ce résultat éminemment curieux que pour une différence de niveau alternative, l'inertie *seule* se comporte comme une résistance au mouvement du liquide, le diaphragme *seul*, également comme une résistance, mais que, placées *en série* dans les conditions convenables pour qu'il y ait résonance, ces deux grandeurs *se neutralisent*, l'ensemble correspondant à une résistance *nulle*, puisque les courants deviennent très intenses.

Chose plus curieuse encore, la tension à laquelle est soumise la membrane est très considérable, puisque cette membrane peut crever alors que l'amplitude du mouvement de bas en haut peut être très faible : la résonance développe donc des pressions *infiniment plus considérables* que celle même qui agit.

Enfin, il est facile de voir ce qui advient du décalage du courant sur la diff. de niveau : par cela même que les oscillations se produisent *en concordance* avec le mouvement de haut en bas, ce décalage est *nul*, ce qui est logique, puisque le diaphragme produit un décalage en avant, l'inertie un décalage en arrière, et que ces deux grandeurs sont neutralisées l'une par l'autre au moment de la résonance.

Les mêmes phénomènes se produisent dans un circuit électrique (*fig.* 183).

Soit un ensemble constitué par une self-induction et une capacité supposées parfaites, c'est-à-dire dénuées de résistance ohmique. Ce circuit est, lui aussi, caractérisé par une certaine période d'oscillation qui nous est apparue lors de l'étude des oscillations électriques. Appliquons-lui une f. é. m. alternative de période quelconque : le courant qui traversera le circuit sera très faible. Sans changer la grandeur de la diff. de pot. alternative, modifions sa *période* de manière à la rapprocher de la période d'oscillation propre du système ; petit à petit, le courant augmente, jusqu'à devenir très *intense* au moment où la concordance exacte, où la *résonance* se produit. Et ceci ne peut nous étonner, car nous concevons maintenant que, dans ces conditions, chaque fois qu'une oscillation se produit dans un sens, précisément à ce moment la f. é. m. agissante lui

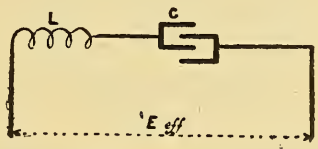


Fig. 183. — Production de la résonance dans un circuit électrique.

donne une *chiquenaude* accélératrice, une *impulsion supplémentaire* qui augmente un peu l'amplitude de l'oscillation, laquelle arrive ainsi petit à petit à une valeur énorme.

En résumé, la résonance se produit lorsque la période propre d'oscillation d'un circuit comprenant self-induction et capacité est justement égale à la période de la f. é. m. alternative que l'on y applique.

A ce moment, la self-induction et la capacité sont exactement *neutralisées* l'une par l'autre, le courant n'est plus décalé sur la f. é. m., et, si nous voulons mesurer la diff. de pot. aux bornes soit de la capacité, soit de la self, nous trouvons qu'elle est *énorme*, bien plus grande que la f. é. m. appliquée aux bornes de l'ensemble du circuit !

Ainsi, effectuant un jour une expérience à l'aide d'une diff. de pot. alternative de 100 volts, je développai à mon insu aux bornes d'un condensateur une tension énorme, dont une bruyante étincelle m'avertit heureusement. Cette tension, mesurée après

coup, fut trouvée égale à 4.000 volts ! Si, par mégarde, je m'étais avisé de toucher le condensateur en question, j'aurais évité à mes lecteurs actuels une indigestion de périodes, de décalages et d'alternances qui dépasse peut-être un peu trop... les bornes.

De même, on n'en est plus à compter le nombre des alternateurs qui ont sauté un beau jour parce que la combinaison de leur self-induction avec la capacité des canalisations a été telle qu'il y a eu résonance et qu'il s'est développé une tension à laquelle l'isolement n'a pu résister.

Aussi, la multiplication des volts sur les lignes alternatives à haute tension n'en est plus à étonner les électriciens. Mais ils n'ont pas toujours été si fiers, et M. Ferranti — qui n'est pas Italien en dépit des apparences — faillit y perdre son latin le jour où, ayant mis ses machines en route sous 3.000 volts, il en trouva 10.000 aux bornes des appareils récepteurs branchés sur la ligne à quelques kilomètres de là ! C'était la résonance, joueuse de mauvais tours, qui faisait son entrée dans la pratique industrielle...

Dernière conséquence des raisonnements ci-dessus :

Si le circuit expérimenté présente, outre la self-induction et la capacité, une certaine résistance, la résistance apparente totale du circuit se réduit, lorsqu'il y a résonance, à la *seule résistance ohmique* [1].

On voit par ce qui précède que, si ennuyeuse, si dangereuse souvent, la résonance peut aussi rendre des services. Grâce à elle, si un circuit présente, par suite de la self-induction, par exemple, une résistance apparente très grande au courant alternatif, on pourra forcer un courant intense à y passer néanmoins en mettant en série avec lui une capacité convenable pour qu'il y ait résonance avec la f. é. m. employée. On peut calculer aisément ces capacités et self-inductions équivalentes au moyen de formules assez simples, mais que nous ne pou-

1. Ceci n'est jamais rigoureusement vrai en pratique, parce que la forme des courants alternatifs pratiques présente toujours quelques irrégularités et qu'il n'existe ni self-induction ni capacité parfaites. Cette réserve est applicable aux différentes conclusions que nous avons eu et aurons à tirer.

vons donner ici. Il nous suffit d'avoir mis en évidence le mécanisme de ces phénomènes.

F. É. M. ALTERNATIVE SUR SELF-INDUCTION ET CAPACITÉ EN DÉRIVATION

Autre histoire, maintenant :

Au lieu de disposer, comme dans le cas précédent, vase à diaphragme et tuyau à grande inertie à la suite l'un de l'autre, *en série*, plaçons-les *en dérivation* comme l'indique la figure 184,

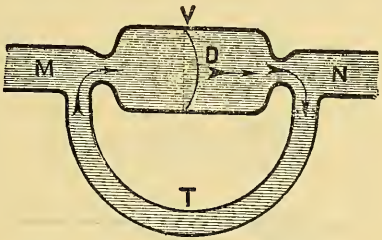


Fig. 184. — Représentation d'une f. é. m. alternative agissant sur capacité et self-induction en dérivation.

puis faisons agir sur cet ensemble notre diff. de niveau alternative.

Ici, chaque dérivation, subissant isolément l'action de la diff. de niveau, se comporte comme si elle était seule, et nous savons ce qui s'y passe pour l'avoir étudié précédemment.

Nous savons, en particulier, que dans la branche T à grande inertie, ce courant est *en retard* de un *quart* de période sur la diff. de niveau agissante ; tandis que, dans la capacité, le courant est *en avance* d'*un quart* de période sur cette même diff. de niveau et, par suite, d'une *demi*-période sur le courant de self.

Que signifie cette avance d'une demi-période ? Cela signifie, par exemple, que, lorsque le courant dans T présente son maximum de M vers N, le courant dans V présente, au contraire, son maximum de N vers M ; plus généralement cela signifie qu'à chaque instant les courants dans les deux branches dérivées sont dirigés *en sens contraires*.

Par conséquent, le courant total résultant de la jonction des deux courants partiels dans les branches communes M et N sera égal non pas à leur *somme*, mais à leur *différence*.

De même et pour la même raison, si une capacité et une self sont placées en dérivation sur une f. é. m. alternative, le courant *total* débité par celle-ci ne sera égal qu'à la *différence* des courants de self et de capacité. Voilà déjà qui est curieux : et, si vous voulez ahurir fortement un monsieur habitué aux allures bon-enfant du courant continu, il vous suffira de lui montrer un ampèremètre M placé dans la branche commune, indiquer (*fig.* 185) par exemple 20 ampères comme courant total résultant de la superposition d'un courant de 80 ampères,

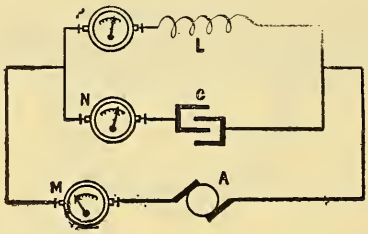


Fig. 185. — Une singularité des courants alternatifs.

indiqué par l'ampèremètre N, et d'un de 100 ampères, indiqué par l'ampèremètre P !

Le courant alternatif a donc une manière bien à lui d'entendre l'addition, et, comme nous ne pouvons l'envoyer à l'école, force est de nous habituer à ses façons.

Bien entendu, dans notre montage, le courant résultant est de même sens que le plus fort des deux courants partiels, c'est-à-dire que, par exemple, dans l'exemple précédent, le courant *total* de 20 ampères est du courant de self-induction, décalé en arrière d'un quart de période.

Ici encore, le résultat de la dérivation de la self-induction par la capacité a encore été de *neutraliser* en partie les effets de la self-induction, puisque nous avons réduit le courant de self de 100 à 20 ampères ; mais, cette fois, la neutralisation s'est traduite par l'*augmentation* de la résistance apparente du circuit et non plus par sa *diminution*, comme dans le cas du montage en *série*.

Notre amateur de courant continu était « estomaqué » tout à l'heure : nous avons en réserve de quoi le « tuer » complètement. Il n'y a pour cela qu'à manipuler un peu le noyau de la bobine de self pour augmenter légèrement sa self-induction et réduire le courant qui la traverse à 80 ampères, c'est-à-dire à la même valeur que le courant de capacité. Dans ces conditions, que devient le courant total ? Vous vous en doutez, puisque les deux courants sont à chaque instant égaux et de sens contraires. Et, stupide, le monsieur verra l'alternateur A débiter un courant *nul* sur deux circuits absorbant chacun 80 ampères !

C'est bien le diable si on le repince jamais à s'occuper de courants alternatifs !

CHAPITRE VINGT-CINQUIÈME

ALTERNATEURS ET TRANSFORMATEURS

Nous n'avons disposé jusqu'ici, comme source de courant alternatif, que de notre spire unique tournant dans un champ uniforme (*fig.* 177). C'est peu ; même si cette spire tournait très rapidement, même si le champ était très intense, la f. é. m. et la puissance fournies ne seraient jamais que très faibles.

Comme dans le cas des machines à courant continu, on est donc conduit à réunir les effets de plusieurs spires. Si, par exemple, on emploie une bobine au lieu d'une spire, les f. é. m. développées dans chacune des spires de cette bobine seront tout naturellement couplées en tension. Comme, de plus, les variations de ces différentes f. é. m. se produisent évidemment *à la fois*, comme toutes ces f. é. m. sont en *concordance de phases*, la f. é. m. totale, celle qui existera entre les deux extrémités de la bobine, suivra les mêmes variations que chacune d'elles, c'est-à-dire qu'elle sera bien alternative, elle aussi.

Remarquez maintenant que la diff. de pot. ainsi créée et le courant qu'elle engendre sont bien plus faciles à collecter que le courant continu. Il n'y a plus besoin d'aller chercher sur l'enroulement les points constamment variables où se localise la diff. de pot. constante. Ici, c'est toujours et uniquement aux extrémités de notre bobine qu'il faut s'adresser. Plus besoin, par conséquent, de ce collecteur compliqué, dont l'entretien minutieux fait le désespoir des électriciens. Deux simples *bagues* isolées, placées sur l'axe de rotation, auxquelles viennent se souder les extrémités de la bobine et sur lesquelles frottent les balais collecteurs, et tout est dit. Par la même occasion, plus d'étincelles aux balais. Mais la nécessité apparaît d'une source spéciale pour la production du champ inducteur constant que le courant alternatif de la bobine ne saurait produire.

Munissons maintenant la bobine d'un noyau en fer pour augmenter l'intensité du flux magnétique à son intérieur, excitons notre champ

à l'aide d'une source auxiliaire à courant continu, et voilà, constitué de toutes pièces, un alternateur susceptible de nous rendre quelques services.

Au point de vue industriel, cependant, le dispositif précédent ne serait pas encore suffisant, parce qu'il ne permet que l'emploi d'une seule bobine.

On opère alors d'une autre façon.

A l'aide d'un système inducteur comportant un nombre d'électros assez considérable disposés en deux couronnes placées en regard l'une de l'autre (dont une partie seulement représentée figure 186), on crée entre les pôles en regard de ces électros des champs alternativement de *sens contraires*. Entre ces deux couronnes, on fait tourner à grande vitesse un induit constitué par des bobines plates de fil se présentant par la tranche et en nombre égal à celui des

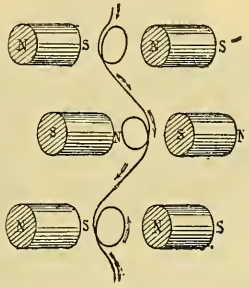


Fig. 186. — Vue d'une partie des couronnes inductrices et induite d'un alternateur Siemens.

paires de pôles. Si nous analysons ce qui se passe dans une de ces bobines, nous voyons qu'elle est successivement traversée par des flux de sens contraires, donc de même sens toutes les deux bobines ; elle est donc le siège d'une f. é. m. alternative dont la période est déterminée par le temps mis par la bobine pour aller d'une certaine position à une autre où le flux qui la traverse se retrouve dans les mêmes conditions d'intensité et de sens.

Il y a donc moitié autant de périodes par tour que de *paires de pôles*, et la *fréquence* du courant s'obtient en multipliant le nombre de périodes par tour par le nombre de tours que l'induit effectue en une seconde [1].

Remarquons maintenant que, puisque les bobines de l'induit sont en nombre égal à celui des paires de pôles, elles entreront ou sortiront toutes à la fois dans les champs des divers électros. Leurs f. é. m. subiront donc toutes aux mêmes moments les mêmes varia-

1. La fréquence des courants industriels est généralement comprise entre 25 et 100 périodes par seconde.

tions, à cela près que toutes les bobines *paires* seront soumises aux champs d'un certain sens, tandis que toutes les bobines *impaires* seront soumises aux champs dirigés en sens contraire. Les f. é. m. paires seront donc exactement *inverses* des f. é. m. impaires, et, pour coupler les f. é. m. de toutes les spires en tension, il faudra avoir soin de faire des enroulements inverses d'une bobine à l'autre. C'est ce que montre la figure 188.

Les extrémités du circuit induit ainsi formé par toutes ces bobines placées à la file arriveront, comme tout à l'heure, à deux bagues placées sur l'axe de l'induit et sur lesquelles frotteront les balais.

La machine que nous venons d'étudier est une machine Siemens, dont la figure 187 représente l'ensemble.

La machine Labour (*fig.* 188) constitue un type analogue.

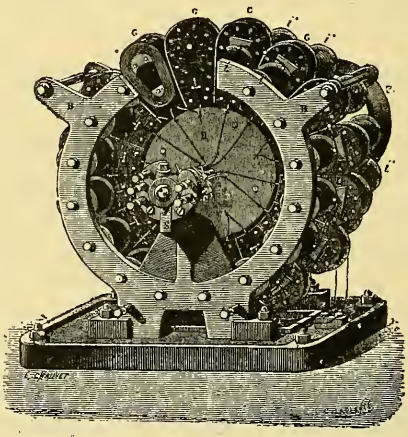


Fig. 187. — Alternateur Siemens.

Il existe encore beaucoup d'autres types d'alternateurs : nous ne les étudierons pas plus que nous ne nous sommes étendus sur les machines à courant continu.

Les uns comme les autres, ces alternateurs doivent être munis d'une dynamo *excitatrice* à courant continu généralement placée sur le même axe que l'induit de l'alternateur (*fig.* 188) et destinée à l'alimentation des inducteurs.

Les alternateurs, considérés en tant que producteurs d'énergie électrique et comparés aux dynamos à courant continu, présentent leurs avantages et leurs inconvénients : ils ont l'avantage d'une construction généralement simple, de l'absence du collecteur et de tous ses inconvénients ; ils ont, en revanche, le grave défaut de nécessiter une excitatrice spéciale qui augmente le prix, la surveillance et l'entretien.

Somme toute, il est assez difficile, à ce seul point de vue, d'estimer de quel côté penche la balance.

Mais les courants alternatifs présentent un avantage énorme quand il s'agit de transporter l'énergie électrique à de très grandes distances, soit qu'on la produise à l'aide des chutes d'eau et qu'on doive dès lors l'envoyer à des centres d'utilisation quelquefois très éloignés, soit qu'on veuille distribuer l'énergie autour de soi dans une région très étendue, et profiter de l'avantage de n'avoir pour cette région qu'une usine unique, plus économique d'installation, plus satisfaisante au point de vue du rendement que plusieurs petites usines disséminées dans la région.

Or, nous avons déjà fait remarquer (p. 242) que, pour ces transports à grande distance, il faut envoyer l'énergie à travers les fils de la canalisation sous une diff. de pot. élevée, parce que la puissance perdue dans la canalisation, étant RI^2, serait énorme dans le cas d'une transmission à faible tension, donc à grande intensité : sous

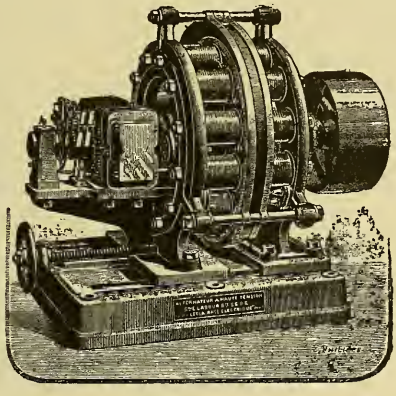


Fig. 188. — Alternateur Labour.

peine de semer tout le long du chemin sous forme de chaleur la presque totalité de l'énergie transmise, il faudrait alors recourir à une canalisation énorme. Énorme et ruineux, c'est ici tout un.

Au lieu de recourir à cette solution inacceptable, augmentons la tension : voyez avec quelle facilité nous améliorons la situation.

Doublons E : comme nous ne nous proposons que de transporter une certaine puissance $P = EI$, il ne nous faut plus, à tension double, qu'une intensité deux fois moindre $\frac{I}{2}$. Or, la perte en ligne, qui était RI^2, devient $R \times \left(\frac{I}{2}\right)^2 = \frac{RI^2}{4}$: en doublant la tension, nous réduisons la perte *au quart*, ou, ce qui est la même chose, nous pouvons donner aux câbles de la canalisation une section *quatre fois moindre* sans augmenter la perte.

Triplons E, le courant est réduit à $\frac{I}{3}$, la perte de puissance à

$R\left(\frac{I}{3}\right)^2 = \frac{RI^2}{9}$: en triplant la tension, nous réduisons la perte *au*

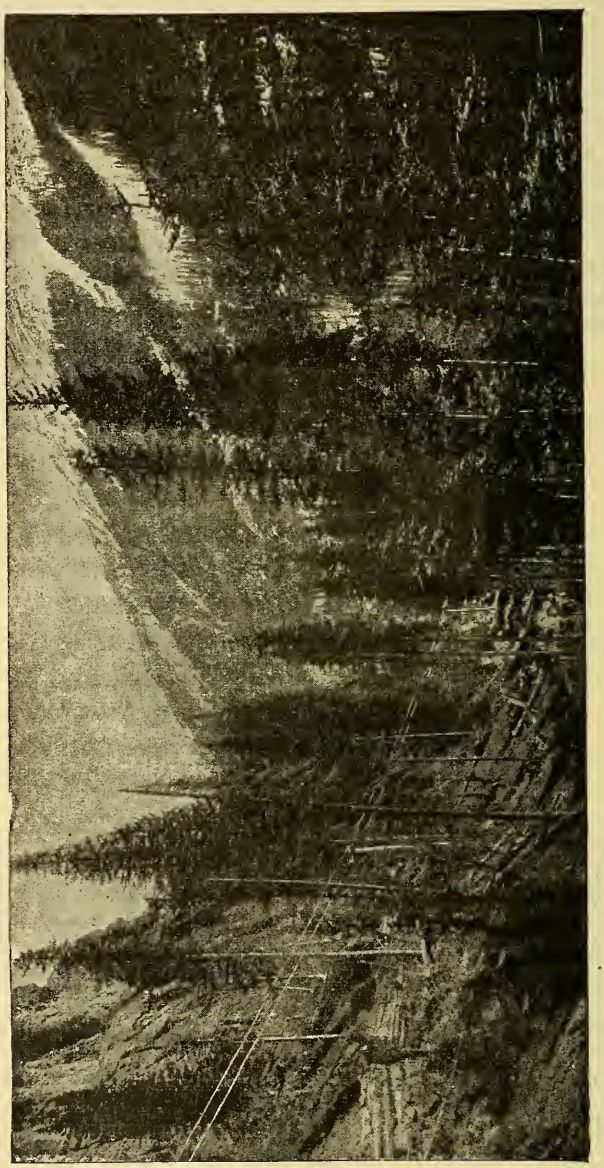


Fig. 189. — Ligne de transport de force de Folsom à Sacramento (Californie).

neuvième : de même, en prenant une tension de $5E$, $10E$, $20E$, nous réduisons la perte au $\frac{1}{25}$, au $\frac{1}{100}$, au $\frac{1}{400}$ de sa valeur, ou, ce qui

revient au même, nous pouvons employer une canalisation énormément moins coûteuse sans augmenter les pertes.

Les pertes diminuent donc beaucoup plus vite que la tension n'augmente, en raison inverse du *carré* de celle-ci. C'est évidemment là un fait très alléchant; il a conduit les électriciens à faire presque des imprudences et à monter pour le transport de l'énergie à longue distance à des tensions de 20.000 et même de 30.000 volts, telles que les fils aériens qui transportent silencieusement ces courants archimortels à travers monts et vallées (*fig.* 189) apparaissent dans la nuit enveloppés d'une fantastique effluve lumineuse !

Ayant réussi à discipliner des tensions aussi formidables, les électriciens ne reculent plus devant rien : ils considèrent maintenant comme un problème enfantin de conduire à travers 2 ou 3 fils de quelques millimètres de diamètre des milliers et des milliers de chevaux à des distances invraisemblables, cinquante, cent, deux cents kilomètres !

Mais, pour transporter l'énergie sous de pareilles tensions, il s'agit d'abord de l'obtenir sous cette forme.

Les machines à courant continu ne s'y prêteraient pas; ni leur enroulement ni leur collecteur ne peuvent résister à des diff. de pot. un peu considérables, et quelques milliers de volts représentent à peu près la limite de leur savoir-faire. Donc, sauf couplage en tension de plusieurs machines, assez ennuyeux, on ne pourrait obtenir à leur aide du courant de très haute tension qu'à la faveur d'une *transformation.*

Or les courants continus ne se transforment pas facilement : tant s'en faut (v. p. 243).

De plus, rendue à son point d'utilisation, l'énergie à haute tension est inutilisable directement. Il faut d'abord la ramener à une tension qui permette son emploi sans danger dans les lampes, moteurs, etc. L'énergie doit être soumise à une seconde transformation, inverse de la première et tout aussi difficultueuse s'il s'agit de courant continu.

Au contraire du courant continu, le courant alternatif, lui, se prête admirablement à cette nécessité primordiale des transformations continuelles. Il plie l'échine avec docilité à tout ce qu'on exige de lui sur ce terrain, se mue de courant de basse tension en courant de haute tension avec une facilité qui n'a d'égale que sa bonne grâce à faire exactement le contraire.

Il suffit pour cela de l'envoyer dans des *transformateurs*, appareils absolument *inertes*, comportant en tout et pour tout un noyau de fer feuilleté et deux enroulements convenablement calculés (p. 271).

La bobine de Ruhmkorff, que vous connaissez bien, est un appareil de ce genre. On l'emploie généralement pour transformer les courants continus — avec un rendement fort médiocre — en courants de haute tension.

Mais rien n'empêche d'en faire — et même avec un rendement meilleur — un transformateur très efficace pour courants alternatifs.

Pour cette application, elle se simplifie même, car son accessoire le plus encombrant, l'interrupteur, doit être supprimé, les variations du courant alternatif même se chargeant de produire les variations de flux dans le noyau.

Mais il faut observer que les variations de flux ainsi réalisées sont tout à fait différentes de celles qui sont obtenues avec le courant continu et l'interrupteur.

Dans ce dernier cas, les variations du flux proviennent de ce que le champ passe continuellement d'une valeur très grande à une faible valeur (jamais nulle par suite du magnétisme rémanent). Ce flux est donc toujours *de même sens*.

Dans le cas du courant alternatif, au contraire, les lancées de cou-

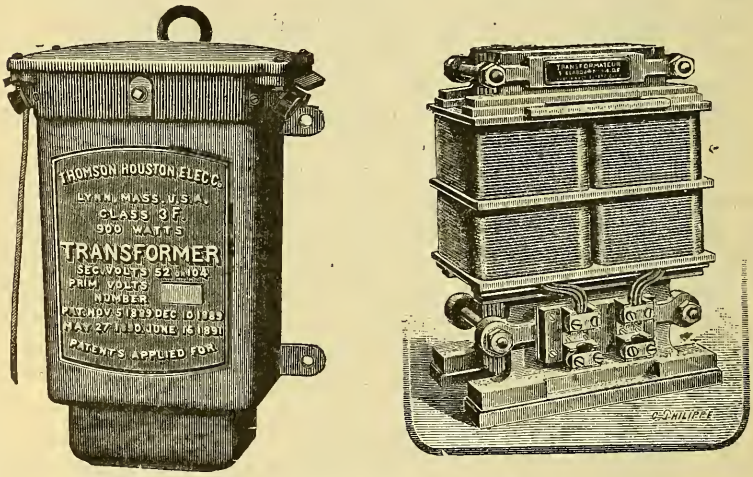


Fig. 190 et 191. — Transformateurs Thomson et Labour.

rant se succédant dans un sens et dans l'autre, il en est de même des variations de flux. Donc :

1° Le flux passe d'une valeur positive très grande à une valeur négative égale et de sens contraire, d'où à chaque fois une variation totale très étendue comme amplitude ;

2° Le temps de la variation du flux maximum au flux minimum étant nécessairement ici *égal* à celui de la variation en sens contraire, nous ne devons plus observer entre les deux tensions directe et inverse l'énorme différence que nous observions (p. 274) dans le cas du courant continu. Ici ces deux tensions maxima sont égales et de sens contraires, et le courant induit est *alternatif* comme celui qui lui a donné naissance ; c'est donc bien là à un véritable transformateur, qui modifie seulement les facteurs du courant, pas sa *forme*, que nous avons affaire.

Le fonctionnement de la bobine de Ruhmkorff sur courants alter-

natifs présente, d'ailleurs, cette remarquable propriété, que la puissance qu'il faut lui fournir *se proportionne d'elle-même* au débit demandé au circuit secondaire :

Nous touchons là à la plus précieuse propriété des transformateurs à courants alternatifs.

Supposons, en effet, que ce circuit secondaire reste ouvert : aucun courant ne pouvant s'y développer, c'est comme s'il n'existait pas et tout se passe comme si le circuit primaire *était seul*. Or, ce circuit primaire présente peu de résistance, puisqu'il est constitué par peu de tours de gros fil, mais possède une grande self-induction par suite du noyau de fer. Et, lorsque nous avons étudié précédemment l'allure du courant dans un pareil circuit (p. 318), nous avons vu que de l'énergie y est cédée à certains moments pour la création du champ, mais est restituée intégralement lors de la disparition de ce champ.

La puissance réelle demandée au générateur qui alimente notre bobine est donc, dans ce cas, à peu près nulle ; elle ne deviendra considérable que lorsque nous utiliserons le secondaire en le fermant sur un appareil d'utilisation, parce qu'alors l'énergie transmise au champ, au lieu de ne pouvoir réapparaître que dans le circuit primaire, sera récoltée par le secondaire et transmise au dehors en proportion d'autant plus grande que la résistance du circuit sur lequel il débitera sera moindre.

D'où, à la fermeture du secondaire d'un transformateur sur un circuit extérieur :

1° Diminution rapide du décalage du courant sur la diff. de pot., le décalage d'un quart de période ne pouvant subsister qu'autant que les restitutions d'énergie au primaire sont égales aux absorptions, c'est-à-dire que la puissance moyenne est nulle ;

2° Augmentation du débit primaire jusqu'à la valeur nécessaire pour que puisse se faire la transmission au secondaire d'une puissance proportionnée à la résistance de ce secondaire.

Ce dernier fait est en pratique le plus important, de sorte que l'intensité primaire, très faible à circuit secondaire ouvert, augmente rapidement à mesure que le secondaire travaille sur une résistance moindre.

Les transformateurs industriels ne ressemblent pas beaucoup, en général, à la bobine de Ruhmkorff, mais les principes qu'ils mettent en jeu sont exactement les mêmes. La principale différence est qu'on y emploie généralement un circuit magnétique *fermé*. Dans ces conditions, la self-induction est plus grande, de sorte qu'un des mérites de ces transformateurs est d'exiger une intensité *à vide* moins grande que ceux à circuit magnétique *ouvert* [1], ce qui est intéressant, car la relativement forte intensité à vide des transformateurs à circuit

1. Mais, par suite des pertes par hystérésis et par courants de Foucault, la faible intensité à vide des transformateurs à circuit magnétique fermé est presque en *phase* avec la f. é. m., et met en jeu, par suite, une certaine puissance *réelle* qui correspond à ces pertes.

magnétique ouvert, quoique *déwattée* — le mot dit bien ce qu'il veut dire — n'est pas sans présenter quelques inconvénients.

Sans que j'aie besoin d'insister et en vous reportant simplement à ce qui a été dit à propos de l'induction mutuelle (p. 271), vous comprendrez que le *coefficient de transformation* de tous ces appareils est donné par le rapport du nombre de spires secondaires au nombre de spires primaires : si celles-ci sont moins nombreuses que celles-là, on a un transformateur *élévateur* de tension ; on a un transformateur *réducteur* dans le cas contraire.

Rien de plus facile, donc, que de résoudre à leur aide toutes les difficultés résultant des transformations de tension exigées par le transport et la distribution de l'énergie à grande distance.

COURANTS POLYPHASÉS ET CHAMPS TOURNANTS

Production des courants polyphasés. — Les courants alternatifs que nous avons étudiés jusqu'ici ne sont pas toujours susceptibles d'une utilisation fort aisée.

Comme le courant continu, ils sont, nous l'avons dit, capables d'alimenter des lampes à arc ou à incandescence, mais c'est là, pour ainsi dire, la seule application à laquelle ils se prêtent commodément : l'électrolyse réclamant évidemment une action toujours de même sens, l'accès de la cuve électrochimique leur est interdit [1] ; quant à l'alimentation des moteurs à courant alternatif simple, moteurs *synchrones* ou *asynchrones*, dont nous avons dû passer sous silence la théorie trop complexe, elle rencontre en pratique des difficultés d'application assez considérables.

Cette dernière lacune est particulièrement regrettable.

Si l'on capte à grands frais l'énergie de chutes puissantes pour l'envoyer au loin à l'aide du courant alternatif, ce ne peut être, la plupart du temps, en vue de cette seule application de l'éclairage, nécessairement restreinte ; l'utilisation sous forme *mécanique* de l'énergie transmise répond à des besoins autrement étendus : que ce mode d'utilisation fasse défaut, qu'il soit seulement d'une réalisation malaisée, et l'utilité du transport à distance s'en trouverait singulièrement atténuée.

C'est pour combler cette lacune, tout en conservant le bénéfice de la merveilleuse faculté de transformation des courants alternatifs que courants *polyphasés* et champs *tournants* ont fait leur apparition. Nous ne pouvons nous dispenser d'en dire quelques mots.

---

1. Sauf certains cas spéciaux et fort intéressants auxquels MM. Brochet et Petit ont consacré en ces derniers temps d'importants travaux.

Qu'est-ce que des courants polyphasés ?

On appelle ainsi plusieurs courants alternatifs de la même fréquence en tout identiques chacun à ceux que nous avons étudiés, mais qui, se produisant dans des circuits différents, ne passent pas au même instant par les différentes *phases* de leurs variations respectives, l'un par exemple atteignant son maximum quand l'autre s'annule, etc.

S'il y a seulement deux courants, ils sont dits *biphasés*, *triphasés* si l'on en considère trois, etc.

Il est facile de concevoir comment on peut fabriquer de tels courants : pour produire des courants biphasés, il suffira de disposer sur l'induit de l'alternateur Siemens, par exemple, *deux fois autant de* bobines que de paires de pôles, et de faire des bobines paires un circuit, des bobines impaires un autre circuit. La série des bobines paires étant, à un moment donné, en regard d'une paire de pôles, position de f. é. m. nulle, la série des impaires sera, au contraire, dans le champ nul, position de f. é. m. maxima (Voir p. 187), etc. Il y aura par suite entre les deux courants un décalage d'*un quart de période*.

Production des champs tournants. — Qu'est-ce qu'un champ tournant ? Le nom le dit assez.

Considérons une bobine de fil traversée par un courant continu ; nous savons (p. 161) qu'elle produit un champ magnétique dont les lignes de force sont dirigées suivant son axe. Que la bobine soit immobile, le champ produit est lui-même *fixe* dans l'espace. Qu'au contraire la bobine, solidaire d'un axe vertical (*fig.* 192), prenne un mouvement de rotation commandé par cet axe, le champ l'accompagne nécessairement dans son mouvement : il est devenu un *champ tournant !*

Inutile de vous dire que nous allons apprendre à produire un champ semblable par des moyens plus élégants et plus pratiques ; mais, si rudimentaire soit-il, le mode de réalisation que nous venons d'imaginer a l'avantage de nous donner de la chose une idée fort nette.

Plaçons dans ce champ tournant un barreau aimanté, équilibré sur un pivot vertical ou suspendu à un fil : sollicité à chaque instant par les lignes de force du champ à se maintenir dans la direction de l'axe de la bobine, le barreau, quoique indépendant de celle-ci, *participe à son mouvement.*

Nous verrons tout à l'heure que notre champ tournant pourrait tout aussi bien déterminer l'entraînement d'une masse, d'un *induit* susceptible d'effectuer du travail extérieur.

Mais nous allons sans plus tarder voir à reproduire notre rotation d'aiguille aimantée, qui constitue maintenant pour nous le critérium d'un champ tournant, par des procédés purement électriques. Ces procédés reposent précisément sur l'emploi des courants polyphasés.

Imaginons deux circuits, A et B, placés à angle droit et traversés par les deux courants biphasés que nous venons d'apprendre à fabriquer. A l'intérieur de ces deux circuits, replaçons notre aiguille aimantée MN (*fig.* 193).

A un moment donné, le courant dans A est nul, celui dans B est maximum ; MN est donc dirigée suivant l'axe de B, puisque B seul agit (*fig.* 193, *a*). Un instant plus tard, au contraire, c'est B qui s'annule alors que A est maximum; par suite (*fig.* 193, *b*), MN est amenée suivant l'axe de A. Elle a d'ailleurs été poussée *progressivement* à cette position, car, dans l'intervalle, B a décru peu à peu, tandis que A augmentait progressivement. Un peu plus tard encore (*fig.* 193, *c*), B est redevenu maximum, mais *en sens inverse*, tandis que A s'est de nouveau annulé. MN devra donc se trouver de nouveau comme en figure *a*, mais en sens inverse, puisque B a changé de sens : elle aura donc accompli à ce moment une rotation de un demi-tour.

Un instant plus tard, B s'annule, A est maximum en sens contraire du cas de la figure *b*, MN vient donc dans la position de la figure *d* ; puis, A s'annulant, B redevenant maximum dans le sens primitif, MN reprend la position de la figure *a*, de sorte que les choses

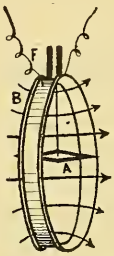


Fig. 192. — Production d'un champ tournant à l'aide d'un circuit mobile.

se trouvent rétablies dans l'état initial pour une rotation suivante.

En somme, la tige MN prend un mouvement de rotation continue, comme lorsque tout à l'heure nous faisions tourner notre champ : ainsi, en combinant convenablement les effets de deux circuits fixes, produisant chacun un champ variable, mais de direction constante, nous avons obtenu comme résultante de ces deux actions un *champ tournant* et, ce qu'il y a de mieux, sensiblement *constant*, Notons, toutefois, que ce champ serait plus constant encore s'il était produit au moyen de trois bobines convenablement placées, traversées par trois courants *triphasés*. D'après ce qui précède, la *vitesse* de rotation du champ est évidemment égale à la vitesse de variation des courants générateurs.

Nous voici donc en état de produire aisément un champ tournant : il s'agit de lui trouver une distraction plus intelligente que de faire tourner une aiguille aimantée.

Or, rien de si facile.

Moteurs à champ tournant. — Plaçons dans ce champ tournant un *induit* constitué par de simples spires individuelles fermées sur

elles-mêmes et disposées angulairement. Si ces spires restaient immobiles, chacune serait soumise évidemment aux mêmes variations de flux que si, le champ étant fixe, la spire considérée y tournait avec une vitesse égale et de sens contraire : elles sont donc siège de f. é. m. alternatives.

Mais, puisque ces spires sont fermées sur elles-mêmes, ces f. é. m. y provoquent des courants intenses qui exercent sur le champ inducteur une réaction violente, à la façon des courants qui parcourent l'induit des moteurs à courant continu (v. p. 218).

On démontre que la résultante de toutes les actions partielles tend très énergiquement à faire tourner l'induit *à la poursuite* du champ inducteur.

Comme résultat de cette poursuite, la vitesse *relative* du champ par rapport à l'induit diminue : il en est donc de même de l'intensité des courants induits et de l'effort mis en jeu.

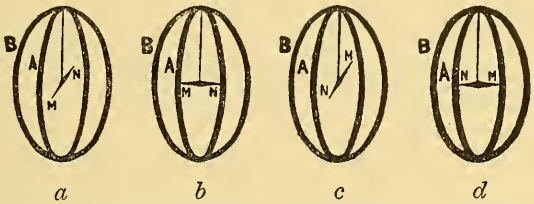


Fig. 193. — Production d'un champ tournant à l'aide de deux circuits fixes.

Si l'induit n'a presque pas de travail extérieur à effectuer, il prendra une vitesse sensiblement égale à celle du champ, le *glissement* de celui-ci par rapport à celui-là sera assez lent, les courants induits peu intenses, ainsi, par conséquent, que la puissance absorbée : plus, au contraire, l'effort sera grand, plus aussi le glissement sera rapide et les courants induits considérables, de sorte qu'on voit qu'ici encore la puissance dépensée se proportionnera d'elle-même à l'effort requis.

De ce sommaire exposé, il résulte donc que les moteurs à champ tournant présentent au démarrage un couple très énergique, comparable à celui qui rend si précieux les moteurs à courant continu en série, parce qu'à ce moment la vitesse du champ par rapport à l'induit est très grande et que les courants induits sont énormes. Mais les moteurs à champ tournant ne sont pas comme ces moteurs-série, susceptibles d'emballements dangereux, car il est bien évident que leur vitesse ne saurait spontanément dépasser celle du champ qui les entraîne : ils rappellent donc, à cet égard, la régularité d'allures qui est le trait le plus intéressant des moteurs en dérivation.

C'est ainsi que parfois, en électricité, les chercheurs rencontrent d'agréables surprises : en s'ingéniant à adapter le courant alternatif, qui y était rebelle, à la production de la force motrice, on l'a si bien

maté qu'on est arrivé à un type d'appareils présentant une véritable supériorité sur ces outils déjà si remarquables que constituent les moteurs à courant continu !

Sans compter que nous n'avons pas encore insisté sur ce qui constitue peut-être la principale caractéristique du moteur à courants polyphasés : sa merveilleuse simplicité.

Nous avons déjà vu tout à l'heure qu'avec lui collecteur et bagues deviennent superflus, puisque les courants qui entraînent l'induit *y prennent naissance;* ajoutons encore que les spires isolées qui constituent son enroulement peuvent être elles-mêmes supprimées on a construit des moteurs à champ tournant dans lesquels l'induit se réduit, en tout et pour tout, à *un bloc de fer massif* porté par un axe non isolé : ce sont les courants de Foucault, dont nous avions appris à nous défier jusqu'ici, qui font toute la besogne dans ce moteur paradoxal !

CHAPITRE VINGT-SIXIÈME

LES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

A LA TRANSMISSION DE LA PENSÉE

TÉLÉGRAPHIE MULTIPLE

L'homme est un animal sociable — dit-on...

C'est, en tout cas, un animal fort expansif.

Venant à point pour procurer à ce penchant des satisfactions inattendues, télégraphe et téléphone ont vite bénéficié d'une large popularité. Et, l'eau coulant toujours à la rivière, les inventeurs se sont précipités sur ce sujet pour en faire leur thème préféré : nulle autre branche de l'électricité n'a provoqué plus de dépense d'une ingéniosité dont il serait vraiment regrettable de ne pas fournir ici quelques preuves. Ce sera l'occasion d'un chapitre quelque peu distinct par son esprit, de ceux qui l'ont précédé, mais il aura, entre autres avantages, celui de fournir quelques exemples suggestifs des principes péniblement absorbés au cours des pages ci-dessus.

Nous avons déjà dit quelques mots du télégraphe Morse ; nous avons montré par quels moyens d'une admirable simplicité on est parvenu à la reproduction à distance de la parole, à son emmagasinement même par le téléphone et le télégraphone. Nous voudrions maintenant montrer avec quelle *maëstria* on a brodé sur ce thème de la transmission à distance de la pensée sous toutes ses formes.

En télégraphie, tout d'abord, des combinaisons surprenantes ont été mises au jour pour obtenir des longues lignes, si coûteuses, le maximum de rendement.

A première vue, le moyen est simple pour arriver à ce résultat : Calino l'indiquerait. Il consiste à faire usage d'appareils rapides, qui lancent et recueillent à très brefs intervalles les émissions de courant.

Après Wheatstone — qui ne s'est pas contenté d'être le Calino de la

chose, mais qui a mis la main à la pâte pour produire un appareil fort remarquable — on a réalisé dans cet ordre d'idées des merveilles de mécanique, qui passent par le Hughes et le Baudot pour aboutir au Pollak Virague. De ce dernier, non encore sanctionné par la pratique, la plaque vibrante réceptrice, analogue à une membrane téléphonique, imprimerait au miroir qu'elle supporte des oscillations recueillies photographiquement au taux de cent mille à l'heure : de quoi télégraphier un volume pendant ce laps de temps !

Mais obtenir des signaux qu'ils se succèdent à intervalles même fort courts est trop naturel pour que j'insiste plus, désireux que je suis de passer à plus intéressant.

Car, peu satisfaits des résultats atteints par les mécaniciens, les électriciens sont venus à la rescousse. Ils se sont mis en tête d'atteler plusieurs appareils sur le *même* fil, d'y lancer, dans l'un et l'autre sens, plusieurs dépêches *à la fois* et — comme dirait Racine — de déchiffrer du tout l'indéchiffrable énigme, en dirigeant vers chaque

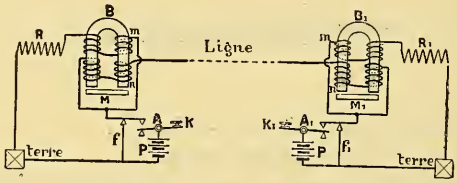


Fig. 194. — Transmission simultanée de deux dépêches en sens contraires.

appareil récepteur tous les signaux qui lui sont destinés, et ceux-là seuls !

Dire qu'ils y ont réussi est superflu, puisque rien ne résiste à ces modernes sorciers ; et, aujourd'hui, c'est sans la moindre émotion qu'on lance dans le même fil jusqu'à quatre dépêches *à la fois !*

Disons, par exemple, comment on peut envoyer simultanément deux dépêches en sens opposés (système *duplex*).

Le schéma (*fig.* 194) indique en A et A_1 les transmetteurs des deux postes, en B et B_1 les récepteurs, le tout dans l'hypothèse de l'application du système au télégraphe Morse.

On remarquera que la clef de Morse de chaque poste transmetteur est disposée de façon que la ligne n'est *jamais coupée* pendant la manipulation de cette clef, le circuit se fermant par la terre soit directement à travers le fil *f*, si l'on n'appuie pas sur la clef K, soit à travers la pile P et la clef si celle-ci est abaissée pour envoyer un signal : première condition, évidemment, pour que les signaux émanés de A, par exemple, soient reçus sans interruption par B_1, même quand on manipule le transmetteur A_1.

Les récepteurs B et B_1, du type Morse ordinaire, en diffèrent cependant en ce que leurs électros comportent non pas un, mais *deux* enroulements égaux et *de sens contraires m* et *n* : l'une des

extrémités de ces enroulements est commune ; mais les deux autres bouts des deux enroulements sont distincts, l'un étant relié à la ligne, l'autre aboutissant à la terre à travers une *ligne artificielle* R, dont la résistance égale celle de la ligne.

Ceci posé, si l'on vient à transmettre des dépêches, de deux choses l'une : ou l'un des deux manipulateurs fonctionne seul, ou ils fonctionnent simultanément.

Premier cas.

A, par exemple, envoie un signal. Le courant correspondant traverse d'abord le récepteur B du poste, mais avant d'y entrer, il s'est bifurqué dans les deux enroulements *m* et *n* en deux courants *de sens contraires* et *égaux*, puisque la ligne artificielle a même résistance que la ligne. Donc, pas d'action sur le récepteur du poste.

De ces deux courants, l'un se ferme directement par R et la terre, et n'a pas d'autre effet. L'autre se dirige à travers la ligne vers le récepteur B_1 de l'autre poste, franchit *un seul* des deux enroulements de B_1 et revient par la terre. L'action de ce courant n'est pas ici contrebalancée : l'armature du récepteur est attirée et inscrit le signal.

Ce raisonnement s'applique identiquement aux signaux émanés de A_1, qui influencent B, mais pas B_1. Donc tout est pour le mieux dans cette première hypothèse.

Second cas : les deux transmetteurs fonctionnent ensemble.

Ici, la chose devient curieuse.

A et A_1 tendant à envoyer au même instant sur la ligne des courants égaux et de sens contraires, cette ligne n'est parcourue *par aucun courant :* pourtant les signaux voulus vont encore s'enregistrer ; car, par exemple, A ne pouvant envoyer le courant sur la ligne, le courant dans la bobine *n* de B n'existe plus ; le courant dirigé à travers *m* vers la ligne artificielle R, existant seul, agit alors pour attirer l'armature. Ainsi le signal émis par A_1 se trouve enregistré exactement, bien que son inscription soit provoquée par A !

La même chose se reproduit, bien entendu, à l'autre poste, pour les signaux émanés de A, de sorte que, malgré la simplicité des moyens mis en œuvre, le problème se trouve complètement résolu.

Des procédés pas beaucoup plus complexes permettent la marche en *quadruplex*, réalisant l'envoi simultané de deux dépêches dans un sens, de deux autres en sens opposé. Et ceci n'est même encore que l'enfance de l'art, puisque M. Mercadier, professeur à l'École Polytechnique, est sorti vainqueur d'une lutte que d'Artagnan lui-même eût certes déclinée, en s'attaquant d'un coup à *vingt-quatre* dépêches !

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE SIMULTANÉES

Dans un autre ordre d'idées, d'ailleurs, on a fait aussi bien.

On a réussi à utiliser les fils télégraphiques pour la téléphonie pendant la transmission même des dépêches !

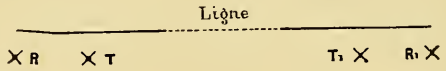


Fig. 195. — Problème de la télégraphie et de la téléphonie simultanées.

Si l'on veut bien se rappeler la délicatesse extrême des courants téléphoniques, la ténuité de leurs actions, les perturbations quelquefois considérables provoquées dans les conversations téléphoniques par la seule induction à distance des fils télégraphiques voisins, ceci pourra à bon droit passer pour un comble : Comment faire pour que ces courants télégraphiques intenses, si gênants quand ils n'agissent qu'à distance sur les minuscules courants télé-

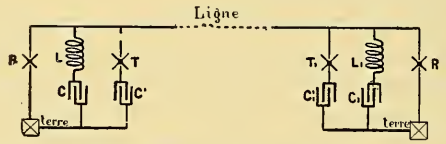


Fig. 196. — Télégraphie et téléphonie simultanées.

phoniques, leur deviennent indifférents lorsqu'ils leur sont mélangés en une complète salade ?

Nous avons à faire intervenir ici un élégant exemple d'application des propriétés combinées de la self-induction et de la capacité.

Nous donnons cet exemple — et les suivants — avec d'autant plus de plaisir qu'ils permettront d'entrevoir le nombre presque indéfini d'applications auxquelles se prête cette dualité de la self et de la capacité, qui constitue vraiment l'une des caractéristiques les plus importantes de l'électricité. Pourtant on n'a encore que peu puisé à cette source féconde, et c'est assurément une des tâches les plus utiles que puissent entreprendre ceux que passionne l'amour des recherches que de bien se mettre en main toutes les particularités de l'action combinée de ces deux grandeurs.

Voyons donc par quels moyens M. Van Rysselberghe résout le paradoxal problème qui vient d'être posé.

Soit (*fig.* 195) une ligne télégraphique qu'il s'agit de faire par-

courir simultanément par des signaux télégraphiques allant du transmetteur R au récepteur R_1, et par des courants téléphoniques allant de T à T_1, sans que les deux ordres de courants se troublent mutuellement, se trompent de chemin.

La première difficulté est d'éviter que les courants télégraphiques ne se révèlent aux appareils téléphoniques en un *tic-tac* désagréable ; ce tic-tac, dans les conditions ordinaires, provient de ce que sur une ligne aérienne, dont la capacité et la self-induction sont faibles, l'établissement du courant télégraphique est presque instantané.

Si donc on n'y prend garde, à chacun de ces signaux, la membrane téléphonique, brusquement attirée, produit un bruit sec.

C'est ce bruit qu'il faut arriver à éviter en prolongeant l'établissement du courant et sa rupture de manière à n'obtenir que le mouvement lent de la plaque téléphonique; car, dans ces conditions, elle ne fournira aucune sensation audible.

Supposons disposé entre la ligne et la terre un ensemble (*fig.* 196) constitué par un condensateur C et une self-induction L convenablement graduée.

Quand on abaisse la clef du manipulateur télégraphique, il faut un temps appréciable pour emmagasiner dans le diélectrique du condensateur et dans l'électro de la self-induction l'énergie correspondante à la f. é. m. de la pile employée : l'établissement du courant, au lieu d'être instantané, se prolonge suffisamment alors pour n'entraîner dans T et T′ que l'attraction progressive de la membrane[1].

Quand, d'autre part, on relève la clef, le courant ne cesse pas non plus instantanément sur la ligne, car l'ensemble self-condensateur restitue son énergie en se déchargeant par la ligne et la terre : d'où une désaimantation également progressive de la membrane téléphonique.

Dans ces conditions, les appareils téléphoniques resteront parfaitement indifférents à l'action des signaux télégraphiques.

Mais encore faut-il que nous sachions où les brancher, ces appareils téléphoniques.

Car nous ne pouvons pas les intercaler sur la ligne, en série avec les appareils télégraphiques : la self-induction de ceux-ci est telle que les courants téléphoniques, courants alternatifs de fréquence élevée, ne l'oublions pas, y trouveraient un obstacle infranchissable et ne pourraient circuler sur la ligne.

Pas davantage nous ne pouvons intercaler purement et simplement nos appareils téléphoniques en dérivation entre la ligne et la terre, car ces appareils présentent une résistance très faible devant celle des appareils télégraphiques, et la totalité des courants télé-

---

1. Tout en étant suffisamment rapide pour permettre aux signaux télégraphiques successifs de ne pas se confondre.

graphiques s'écoulerait directement dans le sol par cette porte ouverte juste à point, plutôt que d'aller accomplir sa tâche dans l'électro imprimeur ; pour les courants électriques comme pour les humains, la loi du « moindre effort » est une loi de nature.

Alors ?...

Alors, M. Van Rysselberghe place tout de même ses téléphones entre la ligne et la terre, mais il intercale dans chacune de ces dérivations, en C_1 et C'_1, un condensateur. Ce condensateur est infranchissable aux courants télégraphiques, il est, au contraire, parfaitement perméable aux courants téléphoniques — et le tour est joué.

TÉLÉPHONIE MULTIPLE

Ce qui précède remonte à 1885 — au siècle dernier, par conséquent.

Depuis, le progrès a marché, et ici comme ailleurs, a fait sentir ses effets.

Grâce à l'un de nos plus savants électriciens, M. Maurice Leblanc, nous sommes, à l'heure actuelle, en état de résoudre un problème bien plus difficile encore que tous les précédents, celui de faire passer par le même fil *plusieurs conversations téléphoniques.*

Plus difficile, on s'en rend compte :

Dans la transmission des signaux télégraphiques, les différents courants émis par un transmetteur donné sont tous à peu près identiques entre eux, sensiblement continus, de même intensité, de même sens ; vient-on à produire entre les signaux émis par chacun des transmetteurs intéressés des différences systématiques de sens, d'intensité, etc., cette différence va se reproduire sur tous les signaux émanés de cet appareil et en permettra le triage.

Dans la téléphonie et la télégraphie simultanées, nous avons affaire à deux natures de courant tout à fait distinctes, et nous utilisons ce fait pour faire passer les courants téléphoniques par un chemin, les courants télégraphiques par un autre chemin.

Ici, plus rien ne semble pouvoir servir de base : les divers courants téléphoniques non seulement sont les uns et les autres alternatifs, mais peuvent affecter toutes les intensités, pire encore, toutes les fréquences possibles ; et c'est vraiment, semble-t-il, une tâche extravagante que de s'attaquer à l'informe mélange résultant de la superposition de trois ou quatre de ces courants !

Self et capacité aidant — pour changer ! — nous y arriverons pourtant.

Nos lecteurs savent (p. 176) que le véhicule de la parole dans le téléphone n'est autre que le courant d'une pile subissant des variations rapides du fait des variations de résistance du microphone sous

le choc des ondes sonores, et transformé en courant alternatif par son passage dans une bobine d'induction.

Substituons à cette pile une machine à courants alternatifs (*fig.* 197) : plus besoin maintenant, pour obtenir un son récepteur, de provoquer des variations de résistance dans le microphone, puisque le courant par lui-même est constamment variable. Sous l'influence de ces variations, la plaque réceptrice vibre de manière à fournir un son dont la

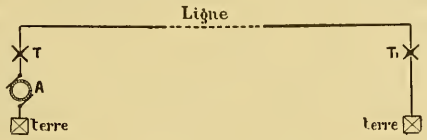


Fig. 197. — Alimentation d'une ligne téléphonique par un courant alternatif.

hauteur correspond tout justement à la rapidité des alternances, à la fréquence du courant : très grave si les ondes du courant se succèdent au taux de 50 à 100 à la seconde, il deviendra de plus en plus *aigu* si la fréquence augmente jusqu'à 5 ou 6.000 et *disparaîtra complètement* au-delà de 34.000.

Helmholtz, en effet, a démontré que l'oreille humaine, qui commence à recueillir des impressions sonores pour des mouvements vibratoires de 30 vibrations par seconde, cesse d'être affectée par des ébranlements dont la fréquence dépasse 34.000.

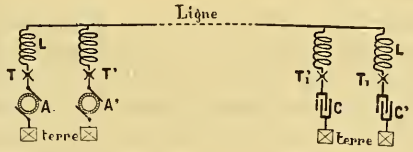


Fig. 198. — Téléphonie simultanée.

Ceci posé, alimentons notre ligne par du courant alternatif de fréquence dépassant largement cette limite, par exemple 50.000.

D'après ce qui vient d'être dit, tant que ce courant restera inaltéré, la plaque vibrante du récepteur, fournissant 50.000 vibrations par seconde, demeurera silencieuse, exactement comme si le courant qui l'alimente était continu.

Vienne-t-on, au contraire, à parler devant le récepteur, l'intensité moyenne du courant va subir de ce fait des variations dont le taux ne sera plus de 50.000, mais variera à l'unisson des ondes sonores entre 30 et 34.000 ; et on conçoit que ces vibrations influeront sur la plaque réceptrice précisément pour lui faire reproduire la parole.

Voilà notre point de départ établi : emploi de courants alternatifs

de fréquence très élevée, au lieu de courant continu, comme mode de transport des ondes sonores.

Mais nous venons de supposer que notre courant alternatif véhiculeur pénétrait sans difficulté dans le récepteur pour y exciter la plaque vibrante. C'est en prendre trop à notre aise.

Vous savez, en effet, qu'il faut y mettre plus de formes pour obtenir ce résultat, car la bobine réceptrice, comme aussi la bobine d'induction du transmetteur, présente de la self-induction L. Pour forcer ce courant à pénétrer dans la bobine (*fig.* 198), vous vous rappelez (p. 328) qu'il faut mettre quelque part sur le circuit $ATLLT_1$ un condensateur C′ tel que le circuit *résone* pour la fréquence 50.000.

Moyennant quoi le courant récalcitrant pénétrera sans difficulté dans le récepteur, et, sans difficulté aussi, agira sur la plaque réceptrice pour lui faire reproduire la voix.

Mais, remarque capitale, cette porte ne s'ouvrira que pour la fréquence 50.000 ; pour tout autre courant véhiculeur de fréquence différente, elle restera impitoyablement fermée.

Le problème, dès lors, est résolu.

Car notre poste transmetteur T et notre poste récepteur T_1, alimentés par la fréquence 50.000 et *accordés* pour cette fréquence, ne seront pas le moins du monde troublés si, sur la même ligne, nous installons un autre système $T'T'_1$ alimenté par la fréquence 60.000 et accordé pour cette fréquence : tous les signaux émanés de T′ seront reçus en T'_1 à l'exclusion de ceux de T′, tandis que réciproquement ils ne s'égareront pas vers T'_1, puisque T'_1 ne s'ouvre qu'aux courants de fréquence 50.000.

Et pas davantage un ensemble $T''T''_1$ accordé pour 70.000 ne troublera les autres non plus qu'il ne sera troublé par eux. La possibilité apparaît même ainsi de multiplier, autant qu'on le veut, les conversations téléphoniques transmises par une ligne unique.

Il convient d'ajouter que cette élégante solution n'a pas encore pris place dans la pratique, où il est probable que des difficultés graves devraient d'abord être surmontées.

Mais sa possibilité théorique est certaine et des expériences ont été effectuées, qui l'ont parfaitement confirmée. Tout au plus a-t-on pu constater que la séparation des voix n'était pas rigoureusement parfaite ; mais les paroles provenant des postes non accordés ne s'entendaient que comme dans le lointain.

TRANSMISSION DE L'ÉCRITURE A DISTANCE
LE TÉLAUTOGRAPHE DE RITCHIE

Ici le problème est essentiellement distinct de ceux précédemment résolus. Il s'agit de reproduire à distance les dessins, l'écriture et

par conséquent tous les mouvements d'une plume qui se déplace sur le papier au poste transmetteur, tous, jusques et y compris les soulèvements de la plume pour accentuer les lettres, pointer les *i*, reprendre de l'encre, etc.

Pour remplir ce programme, il fallait jusqu'ici pour le moins quatre fils de transmission (Gray, 1893).

Il n'en faut plus que deux dans le télautographe Ritchie (1901) !

Et ce point est capital, car désormais le télautographe pourra se substituer à l'appareil téléphonique[1] lorsqu'au cours d'une conversation on voudra transmettre par écrit un ordre précis ou important, dont l'authenticité sera assurée par l'aspect même de l'écriture et dont l'expéditeur conservera le double par devers lui.

Comment réaliser un programme si chargé à l'aide de nos deux fils?

Soit P la pointe du crayon de l'appareil transmetteur (*fig.* 199).

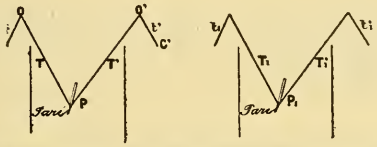


Fig. 199. — Télautographe Ritchie. Principe de la reproduction des mouvements de la plume. Les tiges t, t', t_1, t'_1, sont articulées à leurs extrémités c, c', c_1 c_1', mais c seul a été indiqué par le dessinateur. Les traits verticaux parallèles représentent les bandes de papier qui se déroulent au transmetteur et au récepteur.

Cette pointe est placée à l'intersection de deux tiges TT′ articulées en o et o' à deux autres tiges plus petites t et t' mobiles autour de leurs extrémités fixes c et c'. Il est évident que chaque position de P sur le papier entraîne une position, et une seule, des tiges T et T′ et, par suite, des tiges tt'.

Le récepteur comporte un système $P_1T_1T'_1t_1t'_1$ exactement semblable à $PTT't't'$: Si nous pouvons réaliser entre ces deux systèmes par nos deux fils de ligne une liaison électrique telle que t_1 et t_1' se déplacent toujours, autour de leur extrémité fixe, parallèlement à t et t' (en supposant les axes parallèles), il est certain que P_1 reproduira sur le papier du récepteur les mêmes mouvements effectués par P sur le papier du transmetteur : on verra donc P_1 inscrire la dépêche même écrite à cet instant par l'expéditeur au poste transmetteur.

Or, une telle liaison est facile à réaliser : j'entends qu'elle paraît bien facile quand on a vu l'appareil ; il n'est rien de si simple qu'un problème résolu!

1. Toutes les lignes téléphoniques actuelles sont à deux fils pour éviter les effets d'induction, le fil de retour détruisant l'effet produit par le fil d'aller.

t et t' sont les manettes de deux rhéostats R, R′ comportant un très grand nombre de touches (*fig.* 200) ; t_1 et t'_1 sont les aiguilles de deux galvanomètres apériodiques (c'est-à-dire à indications rapides) et à déviation énergique susceptible de vaincre les frottements du stylet; le galvanomètre t_1 et le rhéostat tR sont reliés à travers une pile k par un des deux fils de ligne et la terre ; t'_1 et t' le sont d'une manière analogue par R′, le second fil de ligne et la terre. La déviation du galvanomètre t_1 dépend de la résistance du circuit, et, par suite, de la position de la manette du rhéostat t : il est dès lors facile de faire en sorte que les positions respectives de t et de t_1 soient toujours *parallèles*. Un réglage analogue étant réalisé pour t' et t'_1, la première partie du programme est réalisée : Si P écrit, P_1 reproduit les mêmes mouvements *avec une exactitude absolue.*

Mais ceci n'est qu'une des parties du problème.

La plume d'une personne qui écrit ne touche pas constamment le

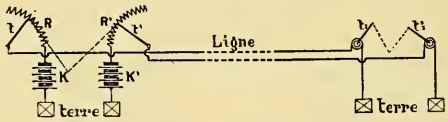


Fig. 200. — Schéma de la liaison électrique entre le transmetteur et le récepteur.

papier. Elle se soulève fréquemment pour séparer les mots, accentuer les lettres, pointer les *i*, et aussi aller reprendre de l'encre. Si le stylet récepteur ne reproduisait pas tous ces soulèvements de la plume transmettrice et suivait tous ces déplacements en frottant constamment sur le papier, il en résulterait une sorte de « gribouillage » d'une lecture malaisée. Cela serait suffisant à la rigueur ; cela ne pourrait passer pour fort élégant.

M. Ritchie ne s'en est pas contenté, et il a eu bien raison, car le moyen qu'il a imaginé pour obvier à cet inconvénient constitue justement la grande originalité de son appareil.

Le procédé en question consiste, au lieu de demander à deux fils supplémentaires leur concours, ce qui supprimerait, nous l'avons vu, la principale raison d'être de l'appareil, à utiliser à la fois *deux choses* différentes chacun des fils de transmission, par une rénovation du principe employé par Van Rysselberghe pour la télégraphie et la téléphonie simultanées (p. 348).

Quand le stylet transmetteur écrit, la tablette qui supporte le papier s'affaisse légèrement sous la pression et vient fermer le circuit d'une bobine de Ruhmkorff B (*fig.* 201). Celle-ci se met à fonctionner et, par l'intermédiaire d'un petit condensateur C, branché avec elle en dérivation sur les deux fils de ligne, envoie dans ceux-ci des courants variables de fréquence assez grande. Le condensateur a naturellement pour effet de conserver l'indépendance des deux fils de ligne

au point de vue des courants continus ou lentement variables provenant des rhéostats et destinés aux galvanomètres.

Ces courants émanés de la bobine trouvent, en arrivant vers le récepteur, deux chemins :

1° L'un est constitué par les bobines du galvanomètre et la terre, mais celles-ci, en raison de leur self-induction considérable, leur sont très peu perméables et n'obéissent qu'aux seuls courants venant des rhéostats;

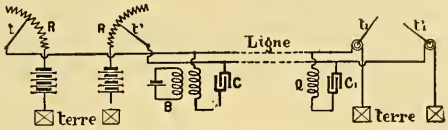


Fig. 201. — Obtention des soulèvements et abaissements de la plume réceptrice.

2° L'autre chemin, constitué par un condensateur C_1 et un petit relais Q, est au contraire facilement perméable aux courants de la bobine, de telle sorte que chaque fois que ces courants sont émis, c'est-à-dire tout le temps que le crayon de l'expéditeur appuie sur le papier, l'armature du relais est attirée.

Or, cette armature est solidaire d'une légère barrette métallique horizontale F (*fig.* 202) sur laquelle viennent reposer dans toutes leurs positions les deux tiges T, T'_1 qui supportent le style récepteur. Tant

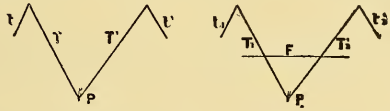


Fig. 202. — Obtention des soulèvements et abaissements de la plume réceptrice.

que l'armature n'est pas attirée, le stylet ne touche pas le papier. Dès que le relais attire son armature, la barrette s'abat de quelques millimètres et le stylet tombe au contact du papier pour se soulever de nouveau, par suite du relèvement de la barrette, lorsque le crayon transmetteur quitte le papier pour séparer les mots, accentuer les lettres, etc.

Tels sont les points vraiment essentiels de cet original appareil.

N'insistons pas sur une foule de détails plus ingénieux les uns que les autres et concernant l'avancement simultané du papier aux deux postes ; l'encrage périodique de la plume réceptrice ; la substitution aisée du récepteur au transmetteur, etc., etc. Il n'est si bonne chose dont il faille abuser.

TRANSMISSION DES IMAGES PAR L'ÉLECTRICITÉ

Un autre problème hante, depuis pas mal de temps beaucoup d'imaginations — auxquelles il n'a encore valu que la fâcheuse migraine.

Il n'est pourtant pas, à tout prendre, beaucoup plus paradoxal que tous les précédents.

On a transmis la pensée d'abord, la parole ensuite, même accommodées à toutes les sauces, ainsi que nous l'avons vu. Arrivera-t-on à transmettre la vue ?

Pourquoi pas ?

Comme le son, la lumière n'est que mouvements vibratoires : on a capté les unes ; pourquoi ne capterait-on pas les autres ? Beaucoup plus subtils sont ces derniers, soit, mais n'auront-ils pas affaire, s'ils veulent résister, à une science chaque jour plus sûre d'elle-même, à des moyens d'action chaque jour plus puissants...

Et la preuve que l'on compte bien réussir c'est que le futur appareil est déjà baptisé : il s'appellera le *téléphote :* pour dire le vrai, c'est le plus fort de la tâche accomplie jusqu'ici.

Aussi nous faut-il être modestes pour l'instant : il serait exagéré de prétendre résoudre tout de suite le problème sous sa forme ultime d'un fil télégraphique qui serait une gigantesque lorgnette, qui permettrait à l'œil rivé à une extrémité de voir se dérouler sous ses yeux le panorama correspondant à l'autre bout du fil !

Pour le moment, notre ambition s'estimerait fort heureuse si, étant donnée sur un écran l'image des objets, des gens ou des paysages à transmettre, telle que nous la fournit la chambre noire photographique, nous parvenions à transmettre cette image à l'autre bout de la ligne sur un second écran, avec toutes ses couleurs, avec ses mouvements continuels.

Et, même si cette image était transmise sans ses couleurs, avec seulement la notion du plus ou moins d'éclairement de ses diverses parties, telle une photographie *vivante*, le résultat, serait, avouez-le, déjà merveilleux et permettrait d'attendre patiemment une solution plus parfaite.

Il est regrettable de le constater, même réduit à ces proportions le problème est terriblement ardu.

On a beau jeu à dire que les ondes sonores constituant la parole et les ondes lumineuses émises par les différentes parties des objets éclairés étant, les unes comme les autres, des mouvements vibratoires, du moment qu'on transmet les unes on doit aussi pouvoir transmettre les autres.

En réalité, il y a entre elles un abîme.

D'abord les ondes sonores, d'amplitude beaucoup plus grande,

peuvent produire des ébranlements *mécaniques* que les moyens électriques nous donnent mille ressources pour amplifier; mais ces ébranlements mécaniques, les ondes lumineuses sont impuissantes à les créer.

D'autre part, si complexes que soient les ondes qui constituent la voix ou les sons à transmettre, elles peuvent toujours se résoudre en une résultante *unique*.

Une comparaison me fera mieux comprendre.

Supposez des chevaux attachés à un fardeau par l'intermédiaire de cordes rayonnant dans différentes directions et tirant chacun de leur côté. Le fardeau ne peut évidemment pas se déplacer *à la fois* dans les différentes directions où il est sollicité. Il se met donc en mouvement dans une direction unique qui est déterminée par la *résultante* de toutes ces différentes actions.

De même, la plaque vibrante du téléphone, sollicitée à la fois à se déplacer de différentes façons par les diverses vibrations, les diverses harmoniques qui constituent la voix, prend un mouvement vibratoire *résultant* dont l'allure est absolument caractéristique de cette voix ou de ce son, si compliqués soient-ils — s'agirait-il de tout un orchestre. Si donc une autre plaque identique est sollicitée, par un mécanisme électrique convenable, à se déplacer de la même façon que la première, elle reproduira exactement le même son.

Ainsi, une action résultante *unique* de tous les sons composants, transmise par une ligne *unique*, suffit pour le téléphone à la transmission du son.

Mais pour la transmission des images, il n'en peut nécessairement plus être ainsi.

Les différentes parties de l'image doivent être transmises *séparément* dans leurs positions respectives, avec les conditions d'éclairement et de forme qui les caractérisent, parce que, si on mélangeait leurs actions pour ne plus produire qu'un effet résultant unique, il ne subsisterait plus aucune signification visuelle.

On est ainsi conduit à avoir un appareil transmetteur, composé d'un très grand nombre de parties distinctes, de petits carrés, par exemple, sur chacun desquels viendra se former et *agir* (on met à profit pour cela la variation de résistance du *sélénium* quand la lumière le frappe) une partie de l'image à transmettre, partie assez petite pour être d'*un aspect uniforme :* ces parties distinctes agiront elles-mêmes — comment, nous nous en inquiéterons tout à l'heure — sur autant de lignes de transmission et sur autant de parties distinctes et disposées dans le même ordre à l'appareil récepteur.

On conçoit, en effet, que chacun de ces petits carrés de l'appareil transmetteur, n'ayant à transmettre au carré correspondant du récepteur qu'une impression uniforme de couleur et d'éclairement, fera sa besogne relativement assez simplement, d'autant plus que la question de *forme* des images sera éliminée tout naturellement ainsi.

Mais ceci nécessite, pour ne pas nuire à l'aspect de l'image, d'avoir des parties très petites, quelque chose comme les points d'une tapisserie; on serait donc amené à un nombre invraisemblable de fils de transmission, c'est-à-dire à une impossibilité matérielle.

Aussi les chercheurs se sont-ils rejetés sur un autre artifice, le même dans tous les systèmes proposés.

Cet artifice consiste à avoir une partie sensible *unique* dans l'appareil transmetteur, et par suite, *une seule* ligne de transmission et *une seule* partie sensible aussi dans l'appareil récepteur.

On fait alors en sorte que toutes les petites parties élémentaires dont se compose notre image, projetées par une lentille, viennent agir *successivement* sur la partie impressionnable du transmetteur, de manière à y déterminer la variation de résistance du sélénium; cette variation est transmise à l'appareil récepteur, où elle agit par exemple par l'intermédiaire d'un électro-aimant sur l'intensité lumineuse d'une lampe en provoquant son obturation plus ou moins complète, et elle s'y traduit *par une reproduction dans la position voulue*, et avec l'intensité lumineuse convenable, de la portion agissante de l'image : sans insister autrement, nous dirons que ceci est réalisable en pratique si les différentes parties se succèdent *lentement*.

Supposons, cependant, que les images partielles se succèdent alors assez rapidement pour que l'image totale ait défilé devant la partie sensible en un temps moindre que 1/10 de seconde. En moins de 1/10 de seconde, par conséquent, les différentes parties de l'image seront venues se peindre les unes après les autres sur l'écran récepteur dans leurs positions respectives, avec leur éclairement relatif, et, comme la même chose se reproduira dans le 1/10 de seconde suivant, et ainsi de suite, en vertu de la persistance des impressions lumineuses dans l'œil, l'image de l'objet visé nous apparaîtra d'une manière permanente avec tous ses mouvements.

Il n'y a qu'un malheur : c'est qu'il y a une incompatibilité.

Les images partielles doivent se succéder très rapidement sur la plaque du transmetteur, puisque les différentes parties de la figure doivent être très petites et défiler toutes en 1/10 de seconde.

Supposons que chacune ait 1 millimètre carré.

Pour une image à transmettre ayant 10 centimètres de côté, par exemple, il y aura 10.000 de ces petits carrés, de sorte que chacun d'eux ne pourra impressionner le transmetteur que pendant la 10.000^{e} partie de 1/10 de seconde, ou 1/100.000^{e} de seconde. Or, pendant ce faible espace de temps, chaque carré lumineux devra produire une variation électrique appréciable, et la plus sensible de toutes les actions électriques de la lumière que nous connaissions jusqu'ici, c'est-à-dire la diminution de la résistance du sélénium sous l'influence des rayons lumineux, nécessite pour se produire un temps plus considérable, quoique déjà très faible.

En somme, le problème, bien que très complexe, est bien proba-

blement réalisable, puisque nous ne sommes arrêtés que par une question de sensibilité.

Un jour viendra sans doute où on découvrira une action plus rapide de la lumière que celle exercée sur le sélénium. Il restera alors à faire pour la transmission des images ce que M. Lippmann a fait pour la photographie, c'est-à-dire trouver un mode d'action de la partie sensible du transmetteur et du récepteur dépendant de la *couleur* agissante; puis il faudra passer de la transmission *des images* à la transmission *de la vue* telle que nous l'avons définie.

Certes, le chemin est long...

Qui oserait dire, aujourd'hui, qu'il est impraticable?

CAUSERIES SUR LE RADIUM

ET SUR

LES NOUVELLES RADIATIONS

Comment j'ai entrepris une tâche difficile. — Beaucoup de mes lecteurs — témoignant par là d'une confiance qui m'honore — m'ont demandé de les initier à un merveilleux chapitre de la physique moderne. Je veux parler de cette étude des radiations qui, entr'ouverte par les célèbres expériences de Hertz sur l'identité de la lumière et de l'électricité, s'est continuée par les travaux sur les rayons cathodiques et sur les rayons X, pour aboutir enfin aux stupéfiantes révélations des rayons de Becquerel et de l'incomparable radium.

Certes, il n'est pas de sujet plus digne de retenir l'attention que ces admirables recherches où apparaît si important et si intime le rôle de l'électricité. Si, dans le domaine pratique, des applications de haute envergure témoignent déjà de leur importance, comme cette étonnante radiographie, comme cette paradoxale télégraphie sans fils, comme ces emplois du radium qui peut-être rénoveront la médecine et ouvriront à la chimie le champ immense de la transmutation, — combien plus précieux encore n'ont pas été leurs fruits dans un domaine plus théorique !

Nos connaissances sur les relations de la matière et de l'énergie approfondies et étendues ; nos idées sur l'unité des forces physiques affermies et complétées bientôt par d'identiques

idées sur l'unité de la matière ; l'atome, l'atome intangible et inerte de nos anciennes croyances, apparaissant désormais comme un monde animé recélant dans ses profondeurs des trésors d'énergie ; la grandiose simplicité qui préside aux choses de l'univers, enfin, se dégageant de plus en plus de l'infinie variété du monde qui nous entoure : quelles intenses satisfactions accordées à notre éternel besoin de savoir, à l'insatiable soif qui nous attire vers l'Origine des choses !

Mais, sans doute, le domaine où s'élaborent de telles conceptions est un domaine passablement aride, dont il est inutile de tenter l'exploration si l'on n'est pas muni du précieux viatique des hautes mathématiques ; sans doute, d'autres que les privilégiés de la science ne verront-ils jamais dans ces hautaines spéculations que ce qu'ils sont tentés d'y voir aujourd'hui : conceptions vagues, hypothèses sans base et sans réalité, élucubrations fantaisistes, pour tout dire, écloses dans le cerveau de rêveurs...

En vérité, ce serait bien dommage !

Aussi, d'abord effrayé par la difficulté de la tâche que me demandaient de trop confiants lecteurs, j'ai réfléchi longuement. Et il m'a semblé que sans faire violence à leurs habituelles conceptions, il est possible de les introduire dans le monde subtil de l'éther ; que sans dépasser beaucoup le niveau de déductions très simples, il est possible de les convaincre que loin de bâtir sur le sable d'aventureuses hypothèses, les savants ne progressent dans le domaine de l'inconnu qu'en étayant chacun de leurs pas de raisonnements logiques, d'expériences convaincantes.

Peut-être me suis-je fait illusion.

En tout cas, la tentative était séduisante : puissé-je être excusé de m'y être hasardé.

CHAPITRE PREMIER

ONDULATIONS HERTZIENNES

QUELQUES PAGES SUR LA THÉORIE DES ONDULATIONS

Ondulations, ou émission? — En toute chose, il faut semer pour récolter.

Partant de ce principe, mes lecteurs ne sauraient s'étonner d'avoir à subir, au cours des pages qui suivent, une épreuve plutôt rude.

Pour pénétrer dans le monde spécial où nous allons évoluer, il est indispensable en effet de nous rendre compte des raisons qui ont imposé aux physiciens la notion essentielle de l'*éther*, si en dehors des conceptions courantes.

Le présent chapitre n'a pas d'autre objet.

Imaginons une cloche suspendue dans l'espace. Un marteau frappe cette cloche ; un son s'en échappe et se répand dans l'espace ; il se propage *de proche en proche*, à la vitesse que vous connaissez bien de 330 mètres par seconde.

La constance de cette vitesse implique, naturellement, que la propagation du son est identique dans toutes les directions : un certain nombre d'observateurs, supposés placés sur les différents points d'une sphère de 330 mètres de rayon ayant la cloche pour centre, percevraient à la fois, après 1 seconde, le son émis par elle. Ceci nous montre qu'un ébranlement sonore se propage dans l'espace *suivant des sphères qui se gonflent rapidement*

Sans hésitation possible, on peut affirmer que le véhicule de ces ondes sonores sphériques est l'*air* lui-même ; car, si l'objet sonore est choqué dans le vide, il n'émet aucun son : il vibre bien, mais rien n'en apparaît; comme nombre de nos connaissances, il parle pour ne rien dire.

Le cas de la lumière est moins simple, en raison, d'abord, de la vitesse extrême de sa propagation. On a pourtant réussi à mesurer cette vitesse par divers procédés : le plus simple consiste à mesurer le temps mis par un rayon lumineux pour aller se réfléchir sur un miroir lointain et revenir à son point de départ. Comme il a été trouvé que cette vitesse, quelle que soit la direction, est toujours la même, soit 300.000 kilomètres par seconde, il est encore évident que la propagation de la lumière se fait elle aussi suivant des sphères ayant la source lumineuse comme centre et se gonflant avec une excessive rapidité.

Mais, chose étonnante, le support matériel indispensable fourni par l'air dans le cas du son est *superflu* dans celui de la lumière : le son ne se propage pas dans le vide, avons-nous dit; la lumière s'y propage, ainsi que le Soleil prend chaque jour la peine de nous le démontrer.

Pour expliquer cette propagation de la lumière dans le vide, Newton admettait qu'elle constitue un agent tout à fait différent du son : des corpuscules lumineux seraient projetés par la source dans toutes les directions et traverseraient l'espace avec la vitesse de la lumière. Les expériences modernes ont paru prouver que Newton n'y entendait rien, jusqu'au moment où les rayons cathodiques (V. p. 391) ont fourni à l'immortel savant l'occasion d'une éclatante revanche.

Si les savants modernes ont manifesté semblable dédain pour la *théorie de l'émission*, c'est qu'apparemment ils avaient à placer quelque... ours de leur composition. Cet ours, c'est la *théorie des ondulations*, copie presque textuelle de celle du son.

Les ondes sonores, avons-nous dit, se propagent sphériquement, en ébranlant de proche en proche le milieu *matériel*, supposé homogène, dans lequel elles se produisent. Pour les ondes lumineuses, il ne peut plus être question d'air ou d'un

autre véhicule *matériel* au sens propre du mot, puisqu'elles se propagent dans le vide. Si cependant, invinciblement poussé par les profondes ressemblances entre les deux ordres de phénomènes, on accepte pour la lumière un mode de propagation identique, on est conduit, de toute nécessité, à admettre qu'un milieu infiniment subtil, l'*éther*, est répandu dans tout l'univers, et non seulement dans le vide des espaces interplanétaires, non seulement dans l'air de l'atmosphère, mais jusque dans l'intérieur des corps les plus denses.

Vous trouveriez difficilement une autre hypothèse pour expliquer la transmission de la lumière à travers l'espace : ou il faut que le corps lumineux, le Soleil par exemple, détache de lui-même des émissaires qui iront porter dans toutes les directions la notion de son existence — théorie de l'émission — ou il faut qu'il délègue cette mission à un intermédiaire susceptible de la transmettre de proche en proche — hypothèse de l'éther et des ondulations.

A priori, les deux théories ont un égal degré de probabilité. Pour décider entre elles, le concours de l'expérience est nécessaire : il a été fatal à l'émission. Celle-ci prévoyait, au contraire de la théorie des ondulations, que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air. Une expérience précise de Foucault lui donna tort sans conteste possible; depuis cet échec mémorable, les démentis se sont multipliés, apportant à la théorie des ondulations autant de confirmations. Elle est unanimement admise à l'heure actuelle, et l'existence de l'éther n'est plus mise en doute, si étonnante pour nos idées terre à terre que puisse être l'existence de ce fluide immatériel, intangible et impondérable.

Mécanisme des propagations ondulatoires. — Quel est le mécanisme de cette propagation d'ondes sphériques sonores ou lumineuses concentriques au centre d'ébranlement ? Nous pourrions être assez en peine de nous l'imaginer, puisque ces sphères sont invisibles pour nous, si un phénomène tangible, frappant et classique, n'était là juste à point pour nous tirer d'affaire.

Ce phénomène, c'est celui des ronds rapidement grandissants

qu'une pierre jetée dans l'eau provoque autour d'elle. Le point de la surface de l'eau choqué par la pierre se déprime sous le choc, puis, la pierre enfoncée, le liquide revient vivement à son niveau primitif, le dépasse en vertu de la vitesse acquise, pour redescendre au-dessous de la surface à l'oscillation suivante, et ainsi de suite.

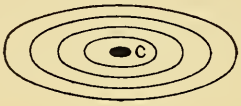


Fig. 203. — Ronds grandissants provoqués à la surface de l'eau par la chute d'une pierre.

Dans ces mouvements alternatifs, la masse d'eau choquée agit, on s'en rend compte, à la façon de la main qui agite l'extrémité d'une corde à sauter : comme dans ce cas, des ondulations *serpentent* à partir de ce point et se propagent au loin à la surface de l'eau. Il y a seulement cette différence qu'avec

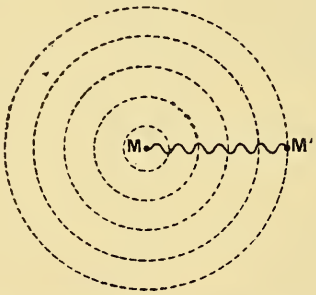


Fig. 204. — Propagation d'un rayon lumineux.

la corde, les ondulations sont limitées à une seule direction, tandis qu'avec l'eau, le phénomène se généralise déjà, puisqu'il s'étend à toute la surface liquide, dans toutes les directions autour du point choqué, sous forme de ronds rapidement croissants. Généralisez encore : admettez que ces ronds grandissants ne soient que la section horizontale de sphères ayant pour centre le point d'ébranlement — et vous aurez une idée très sensiblement exacte de la propagation des ébranlements sonores dans l'air, des ébranlements lumineux dans l'éther.

Si, au lieu de considérer l'ensemble d'une sphère, nous nous bornons à considérer sur cette sphère à sa naissance un point M de sa surface, (*fig.* 204) ce point, à mesure que la sphère s'enflera, s'éloignera du centre avec elle suivant un rayon, mais en parcourant cependant, grâce aux particularités du mode de gonflement révélées par l'exemple des ronds sur l'eau, une ligne ondulée MM'. Cette trajectoire ondulée MM' constitue un *rayon lumineux*.

Or, examinons les choses de plus près.

Nous voyons d'abord que les ronds qui se propagent sur l'eau n'entraînent pour ainsi dire *aucun déplacement de matière :* un bouchon ne se déplace au passage des ondes que pour

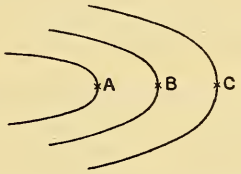


Fig. 205. — AB, BC..., longueurs d'onde, égales entre elles.

s'élever et s'abaisser en cadence. Ainsi, point capital, les molécules d'eau ne se déplacent pas — en dehors de ce mouvement *transversal* d'oscillation, qu'elles ne font que transmettre aux molécules voisines.

Dans cette succession régulière d'*ondulations*, l'écart AB (*fig.* 205) entre deux crêtes ou deux creux consécutifs, qu'on appelle *longueur d'onde,* est assez *variable* avec les circonstances ; par contre, la *vitesse de propagation* des rides est sensiblement *constante.* Donc, si les ronds sont plus serrés (longueur d'onde faible), ils se succèdent plus vite en un point donné de la surface, l'eau ou le bouchon situé en ce point s'élève et s'abaisse plus fréquemment : son *mouvement vibratoire* est d'autant plus rapide que la longueur d'onde est *plus petite.* Remarquons que ce bouchon effectue une oscillation aller et retour, une vibration complète entre les passages de deux crêtes ou de deux creux successifs, distants de ce que nous venons d'appeler une longueur d'onde : ainsi — définition qui nous sera fort

utile — *la longueur d'onde est le chemin parcouru par les ondes pendant la durée d'une oscillation.*

En acoustique, les choses ne se passent pas autrement. Ici, encore, la transmission se fait sans déplacement de matière autre que le mouvement d'oscillation *transversal* des molécules d'air; la vitesse de propagation est encore constante, 330 mètres par seconde. Donc les vibrations sonores seront aussi d'autant plus rapides que la longueur d'onde sera plus petite. Soient par exemple des ondes sonores de 2 centimètres de longueur d'onde. Puisqu'en un point quelconque ces ondes se succèdent à raison de 330 mètres par seconde, la molécule d'air située en ce point sera rencontrée en une seconde par $\frac{330}{0,02} = 16.500$ ondes, sera sollicitée 16.500 fois à répéter son mouvement transversal d'oscillation sur place : elle fera 16.500 vibrations par seconde. Elle n'en ferait que $\frac{330}{0,50} = 660$ par seconde si la longueur d'onde était de 50 centimètres.

Tout le monde sait qu'à la rapidité du mouvement vibratoire sonore correspond la *hauteur* du son : plus le mouvement vibratoire est rapide, donc plus la longueur d'onde est faible, plus le son est *aigu*. Nous verrons sous quelle forme cette notion se retrouvera dans le cas des rayons lumineux.

Rapidité des vibrations lumineuses. — Notre oreille est ainsi faite qu'elle ne peut percevoir les mouvements vibratoires trop lents ou trop rapides. Au-dessous de 32 vibrations par seconde, au-dessus de 34.000, elle cesse d'être impressionnée. Or, tous ces sons, même celui qui bat 34.000 vibrations à la seconde, laissent mesurer leur *fréquence* par des procédés mécaniques simples et directs : Cagniard de la Tour, à l'aide d'une roue dentée tournant à une vitesse connue et dont les dents frappaient successivement une carte, produisait par ces chocs des sons de fréquence connue qu'il amenait, en variant la vitesse de rotation, à l'*unisson* de ceux dont il voulait connaître la hauteur.

Pour la lumière, c'est une toute autre affaire : des procédés de ce genre échoueraient lamentablement devant des mouve-

ments ondulatoires dont la rapidité déconcerte l'imagination. Les mouvements de l'éther, pour impressionner notre œil, doivent effectuer pendant chaque seconde au moins 500 *trillions* d'oscillations! Il est vrai que ceci ne nous dit pas grand'-chose, tellement c'est formidable : essayons d'une comparaison.

Imaginons que, matérialisant le fameux *péril jaune*, les innombrables hordes de l'Asie déversent sur l'Europe une effroyable armée de 50 millions de combattants. Supposons que les 10.000 kilomètres qui les séparent de nous soient franchis sans encombre. Eh bien, à raison d'un mètre par pas, de 10 millions de pas par homme, le nombre total des pas effectués par ces 50 millions de soldats dans cette gigantesque randonnée sera tout simplement égal au nombre des oscillations qu'un modeste rayon lumineux doit effectuer en une seconde !

Comment mesurer de tels nombres ?

Dans l'impossibilité évidente de s'attaquer directement à eux, on peut essayer de tourner la difficulté en mesurant la longueur d'onde.

Supposant en effet cette longueur d'onde trouvée, il suffira, comme pour le son, de diviser par sa valeur le nombre représentant le chemin parcouru en une seconde, soit 300 millions de mètres (v. p. 364), pour obtenir le nombre de vibrations effectuées pendant cette seconde.

Mais n'est-ce pas changer notre cheval borgne contre un aveugle que de vouloir nous attaquer à la longueur d'onde ? Non ; car la vitesse de la lumière est elle-même si énorme que malgré la fréquence épouvantable des vibrations lumineuses, l'onde s'avance d'une quantité appréciable pendant le temps d'une seule oscillation : j'ai parlé tout à l'heure de 480 trillions de vibrations par seconde. L'onde parcourant dans ce temps 300 millions de mètres, il en résulte que pendant le temps d'une seule ondulation elle avance de $\frac{300.000.000}{480.000.000.000.000}$ soit $\frac{1}{1.600.000}$ de mètre ; c'est-à-dire que la longueur d'onde de ces vibrations — qui constituent la lumière rouge — ressort à un peu moins de 1 millième de millimètre.

Or une pareille longueur est parfaitement mesurable avec nos humaines ressources : les micrographes — Bertillons de l'infiniment petit — mensurent journellement sous leur objectif des organismes de ce calibre-là.

Le tout est de savoir comment nous y prendre, et me voilà forcé de vous parler d'un phénomène dont nous ferons maintes applications, celui des *interférences*.

Ce que sont les interférences et à quoi elles nous servent. — Voici, en O (*fig.* 206) un point lumineux *très petit*, émettant une lumière simple[1], par exemple la belle

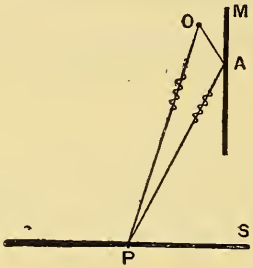


Fig. 206. — Mécanisme du phénomène d'interférence.

lumière jaune obtenue en brûlant de l'alcool salé. S est un écran qu'éclairent à la fois les rayons directs de O et ceux réfléchis très obliquement par le miroir M, très voisin de O.

Vous supposez, évidemment, que sous l'effet des deux séries de rayons, l'écran S est à peu près uniformément éclairé. Erreur ! Un système de bandes alternativement sombres et brillantes, parallèles au miroir, s'étale sur l'écran. Ce sont les franges d'*interférence*.

Ce phénomène à l'abord mystérieux a sa cause dans le mouvement vibratoire même de la lumière. Il est inexplicable dans le système de l'émission ; à vouloir l'expliquer, Newton épuisa son génie. La théorie des ondulations, au contraire, interprétée par l'illustre Fresnel, explique ce phénomène le sourire sur les lèvres.

---

1. La lumière blanche, nous le verrons, est fort complexe. Elle ne donnerait rien de net dans l'expérience décrite.

Soit P un point quelconque de l'écran. Il est frappé à la fois par un rayon direct OP et par un rayon réfléchi OAP. Sous l'effet combiné de ces deux vibrations, la molécule d'éther située en P va prendre un mouvement qui en sera la résultante.

Or, l'action en vertu de laquelle les rayons lumineux font osciller transversalement les molécules d'éther comme autant de bouchons flottant sur l'eau agitée par la chute d'une pierre, résulte de la forme même de leur propagation (v. p. 366), figurée, infiniment amplifiée, sur une partie des trajectoires OP et OAP. Je suppose qu'à leur arrivée en P ces deux mouvements vibratoires en soient au même point de leur oscillation, par exemple au moment où le mouvement se fait de droite à

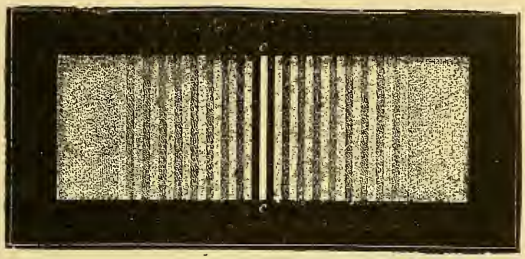


Fig. 207. — Franges d'interférence.

gauche. Ils sollicitent alors la molécule P d'une façon *concordante* et qui *restera telle*, les vibrations se succédant identiques dans les deux trajectoires ; cette molécule vibre donc *très fort*, ce qui signifie que P est un point *très éclairé*. C'est, disent les physiciens, un *ventre* d'oscillations.

Qu'au contraire les mouvements de OP et OAP soient exactement discordants à leur arrivée en P ; alors la molécule P, sollicitée par l'une à aller vers la droite, tirée par l'autre vers la gauche, fera ce qu'eût fait à sa place l'âne de Buridan : elle restera immobile, et le point P sera *obscur*. Ce sera un *nœud*, comme disent les physiciens : comparable en ceci aux commissions d'enquêtes parlementaires, un nœud a donc pour caractéristique que de la lumière ajoutée à de la lumière y fait de l'obscurité.

Ainsi la théorie des ondulations conçoit fort bien qu'il y ait

sur l'écran des endroits éclairés et des endroits obscurs : elle va nous dire maintenant comment ils sont répartis.

Si OP et OAP avaient à leur arrivée en P parcouru depuis O des chemins rigoureusement égaux, il est évident qu'ils y arriveraient au même point de leurs périodes respectives et y feraient de la lumière ; mais ceci est impossible, la ligne brisée OAP étant plus longue que OP : il y a toujours entre les deux rayons une certaine *différence de marche*, excès de OAP sur OP. Toutefois, si celle-ci est pour le point P_1 (*fig.* 208) juste égale à un *nombre exact* de longueurs d'onde, ce sera, au point de vue de l'effet sur P, comme si elle était nulle, les ondes se répétant

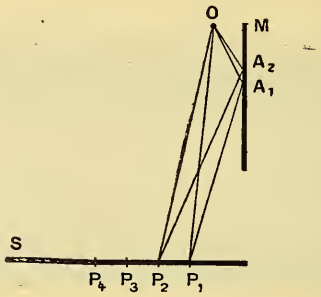


Fig. 208. — Succession des nœuds et des ventres.

identiques à chaque longueur d'onde : les mouvements de OP_1 et de OA_1P_1 seront alors toujours concordants en P_1, et celui-ci sera un ventre.

Mais éloignons graduellement P vers la gauche : la différence de marche des rayons qui le frappent s'accroît lentement, avec leur obliquité sur l'écran S. Quand, arrivés en P_2, cet accroissement de OP_2 sur OA_2P_2, compté depuis la position P_1, atteint $\frac{1}{2}$ longueur d'onde, il y a discordance absolue des deux mouvements qui sollicitent P_2, et P_2 est obscur. Entre P_1 et P_2, on passe graduellement de l'éclairement à l'obscurité.

De P_2 à P_3, la différence de marche, à force de croître, redevient égale à un nombre entier de longueurs d'onde : de ce chef, P_3 est un ventre. On trouve ainsi sur l'écran une série de ventres P_1, P_3, P_5... séparés par des nœuds P_2, P_4... ; ces

faits se reproduisant non seulement dans le plan de la figure, mais sur toute la surface de l'écran, celui-ci doit au total se trouver décomposé en bandes alternativement brillantes et obscures.

C'est exactement ce qu'indique l'expérience, qui fournit ainsi à la théorie des ondulations l'appui précieux de son approbation.

Il résulte d'ailleurs de notre raisonnement que du milieu d'une bande brillante au milieu de la suivante, la différence de marche — excès de OAP sur OP — varie justement *d'une longueur d'onde*. Comme cet excès est aisé à calculer trigonométriquement, on voit — et c'est tout dire — que la mesure des longueurs d'onde, base de l'optique moderne, est à la portée du moindre bachelier.

Voilà donc un mauvais pas franchi — et mes lecteurs apprendront vraisemblablement sans regret que les raisonnements ci-dessus coïncident à peu près avec le maximum d'énervement que je me crois capable de leur infliger.

Influence de la longueur d'onde sur la couleur de la lumière. — Les interférences aidant, on a pu constater que la longueur d'onde d'une lumière *simple* déterminée est dans des conditions bien définies *rigoureusement invariable*. Peu de choses en ce monde en peuvent dire autant, à commencer par le mètre, qui, lié par sa définition même aux vicissitudes du globe, risque fort de perdre d'ici quelques milliers d'années un millionième ou deux de sa longueur. Voilà, m'assurez-vous, qui ne saurait vous empêcher de dormir ! Moi non plus ; mais il est certains esprits méticuleux pour juger la chose intolérable et réclamer la mise en accusation immédiate du mètre et son remplacement dans ses fonctions d'étalon par la longueur d'onde de la flamme du sodium.

Au contraire, la longueur d'onde varie d'une couleur à l'autre. Si même nous suivons les couleurs dans l'ordre où elles se succèdent dans le spectre solaire, nous constatons, chose bien intéressante, que la longueur d'onde *décroît régulièrement :* relativement espacées quand elles sont produites avec la lumière rouge, les franges d'interférence se resserrent progressivement si l'on fait varier la lumière, dans

l'ordre du spectre, depuis le rouge jusqu'au violet. Partis de 620 millionièmes de millimètre pour le rouge, nous sommes à 380 millionièmes à l'autre bout du spectre. Inversement, la *fréquence* augmente du rouge au violet, passant de 480 trillions pour le rouge à 790 trillions pour le violet.

Nous apprenons ainsi deux choses : d'abord, que le prisme, instrument merveilleux, trie les rayons lumineux précisément d'après leur longueur d'onde, le rouge, de grande longueur d'onde, étant le moins dévié, le violet, de faible longueur d'onde, étant au contraire le plus *réfrangible*. Ensuite, que la *couleur* de la lumière doit être mise en parallèle avec la *hauteur* des sons, l'un et l'autre étant sous la dépendance de la rapidité des vibrations. Un rayon rouge correspond à un son grave, un rayon violet à un son aigu. L'analogie se poursuit, frappante, jusqu'aux moindres détails, pour justifier les physiciens de l'audacieuse assimilation *rendue possible par la conception de l'éther*.

Exploration du spectre solaire. Spectre chimique; l'ultra-violet. — Dans cette superbe expérience du spectre où la lumière blanche, décomposée en ses éléments d'après leurs longueurs d'onde, révèle le secret de son hétérogénéité, notre perception visuelle cesse d'un côté au rouge, de l'autre au violet. Le spectre s'arrête-t-il là en effet, ou nous faut-il accuser la perfection de notre organe visuel?

C'est à cette dernière opinion, hélas, qu'il faut nous résigner.

Notre œil, si admirable qu'en soit la perfection, ne répond qu'à une gamme de vibrations fort peu étendue; sa sensibilité est à cet égard bien inférieure à celle de l'oreille. Celle-ci s'accommode d'une succession de sons s'étendant sur plus de 8 *octaves*, une note d'une octave vibrant comme on sait 2 fois plus vite que celle de l'octave au dessous : les vibrations peuvent donc devenir à partir du son le plus grave 500 fois plus rapides sans que notre oreille cesse d'être... compétente.

L'échelle des radiations visibles, au contraire, ne comporte même pas *une* octave, puisque, commençant à 480 trillions, elle devrait s'étendre pour cela jusqu'à 960 au lieu de s'arrêter à 790. De telles radiations existent bien, nous allons le

constater, et si nous ne les voyons pas, c'est que pour elles, notre œil est aveugle!

Combien il est dommage qu'il en soit ainsi! Vous avez certainement remarqué combien la lumière, après avoir passé du rouge aux tons si différents du jaune et du vert, semble revenir à ses origines au bout du spectre, combien le violet extrême présente d'analogie avec le rouge : l'analogie se fût sans doute haussée presque à l'identité si l'échelle visible s'était étendue à l'octave tout entière; elle eût abouti à une concordance des couleurs extrêmes comparable à celle de deux notes à l'unisson, qui frappent notre oreille de la même façon. Alors l'audacieuse pensée qui a conduit les physiciens à mettre en parallèle la lumière et le son se fût imposée pour ainsi dire d'elle-même aux premiers observateurs du spectre; alors, la lumière eût été dès l'abord considérée comme le résultat d'un mouvement vibratoire, et la voie féconde que vient à peine d'entamer l'esprit humain aurait déjà livré pas mal de ses secrets.

Mais les vibrations de l'éther ont d'autres propriétés que celle d'impressionner notre œil : nous allons, grâce à ce fait, constater que le spectre solaire se prolonge en réalité bien en dehors de ses limites visibles.

On sait, par exemple, quelle action chimique puissante possède la lumière, action mise à profit de si étonnante façon par la photographie.

Or, lorsque la lumière blanche est décomposée par le prisme, une différence essentielle apparaît à cet égard entre ses divers éléments : presque nulle dans le rouge, l'action sur la plaque photographique augmente graduellement lorsqu'on se dirige vers le violet, et y devient très intense. Après une montée aussi régulière, il serait surprenant que cette action cessât brusquement au delà du violet. Eh bien! non-seulement elle ne cesse pas en effet, mais elle *augmente encore*, pour ne commencer à diminuer et disparaître qu'après une lointaine incursion de la plaque dans cette région obscure de l'*ultra-violet*.

On conçoit, au surplus, que la combinaison de l'action chimique sur la plaque et du phénomène des interférences nous permette encore de décider, malgré l'impuissance de nos yeux,

si l'origine de ces radiations ultra-violettes est encore un mouvement vibratoire, et, si oui, quelle est sa longueur d'onde. La réponse est naturellement affirmative sur le premier point, et nous pouvons ainsi déceler des radiations dont la fréquence, pour se dénombrer, mobilise un autre terme de la numération écrite, celui de *quatrillion*[1].

Ces rayons ultra-violets ont la propriété remarquable d'illuminer vivement certains corps phosphorescents, qui transforment ces radiations très rapides en radiations visibles. Une autre de leurs propriétés, fort importante à inscrire sur nos tablettes et très inattendue, est celle de provoquer la décharge des corps électrisés en rendant conducteur le milieu ambiant.

Spectre infra-rouge. — Portons maintenant nos investigations à l'autre bout du spectre. Ici, plus d'action chimique ; c'est à l'action *calorifique* qu'il faut nous adresser. Cette action est en effet répartie dans le spectre d'une manière toute spéciale. Promenons dans ses diverses parties un thermomètre très sensible : à peine influencé dans le violet et dans le bleu, le thermomètre monte progressivement à mesure qu'il s'en éloigne ; l'effet calorifique continue à s'accroître jusqu'aux parages du rouge extrême.

Et si nous pénétrons maintenant dans le prolongement obscur du spectre, un phénomène analogue à celui tout à l'heure constaté à l'autre bout peut être observé : non seulement le thermomètre ne baisse pas, mais il monte, il monte toujours, révélant la présence de radiations calorifiques abondantes dans cette région *infra-rouge* dont l'étendue est considérablement plus grande que celle du spectre visible. Ici encore les radiations livreront le secret de leur mécanisme et de leur longueur d'onde grâce aux interférences, dont un thermomètre sensible à défaut de notre œil trahira par son lent déplacement les maxima successifs. Les longueurs d'onde ainsi mesurées croissent naturellement à mesure qu'on s'avance dans l'infra-rouge, et la *chaleur* — dont la lumière et les rayons chimiques

1. Il serait étonnant qu'il n'existât pas de vibrations encore plus rapides. Ces vibrations extra-rapides, effectivement, ne seraient autres que les célèbres *rayons N*, découverts par Blondlot.

ne sont au reste que des modalités, douées, en raison de leur fréquence, de propriétés supplémentaires — nous apparaît à son tour comme le résultat d'un mouvement vibratoire de l'éther.

Continuons notre voyage dans la nuit. Saluons au passage, fort loin dans l'infra-rouge, nos dernières connaissances, les *rayons de Rubens*, dont la longueur d'onde atteint 50 millièmes de millimètre, qui sont ainsi les moins réfrangibles reconnus à ce jour dans le spectre de décomposition de la lumière blanche.

A partir de là, plus rien : plus rien, du moins, qui soit décelable par nos moyens imparfaits, soit qu'en réalité il n'y ait plus rien ou plus assez, soit que plus probablement, ce manteau de brume et de poussière qu'est à ses plus beaux jours l'atmosphère terrestre ne se charge d'enlever les radiations les plus absorbables, justement celles qui nous occupent. Et tout serait définitivement fini au-delà des rayons de Rubens si, grâce à Hertz, nous ne nous trouvions brusquement, beaucoup plus loin encore, au cœur même de notre sujet!

LA DÉCOUVERTE DE HERTZ

Il n'y a pas d'isolants pour l'électricité. — Demandons pourtant à la patience de nos lecteurs un dernier effort. Je ne voudrais pas entrer en matière sans insister à nouveau sur une conception capitale, tout à fait en désaccord avec des idées chères aux débutants en électricité.

Cette conception, c'est celle de la perméabilité de *tous les corps* pour l'électricité.

Comme nous l'avons longuement expliqué, en effet (voir p. 285), il n'y a pas de corps *isolants* par l'électricité : Nous savons faire passer les courants intenses de la haute fréquence (p. 296) entre les armatures d'un condensateur, bien que l'espace intermédiaire soit occupé par du verre ou par du mica, par de l'air ou par le vide.

S'il y a une énorme différence — ce qui n'est pas niable — entre les corps dits conducteurs et ceux dits isolants, cela ne vient donc pas de ce que la résistance opposée par ces derniers (ou diélectriques) est infinie, mais de ce qu'elle est d'*une autre*

nature. La résistance des corps conducteurs, dit M. Poincaré, rappelle la *viscosité* des liquides : de même que l'avancement d'un solide dans un liquide visqueux, dans de la poix, peut se produire et continuer indéfiniment sous l'action d'une force *continue*, même faible, de même l'électricité peut circuler perpétuellement dans un conducteur sous l'action d'une diff. de pot. *constante*.

La résistance opposée par les diélectriques, par le vide, au contraire, est de nature *élastique :* c'est l'analogue de la résistance au bandage d'un ressort (*fig.* 209) : cette résistance commence par être très faible, mais lorsque l'équilibre est atteint, en AB par exemple, entre notre force et la réaction du ressort, nous

Fig. 209.

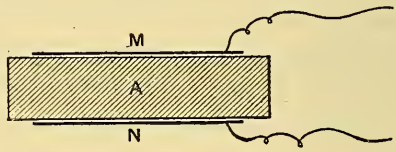


Fig. 210.

Fig. 209. — Bandage d'un ressort, analogue à la charge du diélectrique d'un condensateur sous diff. de pot. constante.

Fig. 210. — Perméabilité initiale des diélectriques sous diff. de pot. constante : courant de charge d'un condensateur.

serions fort en peine d'aller plus loin. De même, sous l'effet d'une diff. de pot. continue, un courant *passe d'abord* entre les deux armatures MN à travers le diélectrique A : c'est le courant *de charge*, qui *tend* en quelque sorte à la manière de membranes élastiques l'éther imprégnant le diélectrique (v. p. 286) jusqu'au moment où sa tension équilibre la diff. de pot. appliquée : alors ce courant s'éteint définitivement, comme si la matière n'était plus perméable : c'est ce qui a pu justifier la conception des corps isolants tant que les physiciens n'ont eu à leur disposition que des f. é. m. continues.

Avec des f. é. m. variables, alternatives (v. p. 304), il en va autrement.

Rien de plus aisé, avec une force dirigée alternativement à droite, puis à gauche, que d'amener indéfiniment notre ressort de AB′ à AB″ et de AB″ à AB′ (*fig.* 211). C'est l'image de la faci-

ité avec laquelle un courant alternatif *est produit indéfiniment dans un diélectrique* par une f. é. m. alternative : courant peu intense, si la fréquence est faible, si les mouvements de AB sont très lents; — courant très intense, au contraire, si l'on arrive aux alternances rapides de la haute fréquence[1].

Si nous savions produire des courants électriques de fréquence comparable à celle des ondes lumineuses, la conductibilité du vide pour eux atteindrait presque l'ordre de celle des métaux au courant continu ; mais ceux-ci, chose piquante, seraient au contraire imperméables à ces courants, pour une raison identique à celle qui fait qu'un corps immergé dans un liquide visqueux, dans de la poix, éprouverait du fait de

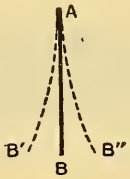


Fig. 211. — Mouvement alternatif d'un ressort sous l'action d'une force alternative, correspondant au courant alternatif produit dans un diélectrique par une diff. de pot. alternative.

la viscosité une résistance énorme, si on essayait de l'animer d'un mouvement de va-et-vient extrêmement rapide.

Remarquons de plus que, dans les métaux, cette sorte de viscosité opposée au passage du courant coûte toujours la dissipation, sous forme de chaleur, d'une partie de son énergie (effet Joule). Dans les diélectriques, au contraire, il n'y a pas *dissipation* de l'énergie, mais *emmagasinement ;* en tendant un ressort, on dépense bien de l'énergie mécanique, mais celle-ci est restituée presque intégralement quand le ressort se détend.

Pour l'éther, c'est encore mieux ; il agit, lui, comme un ressort parfait, de sorte que les courants alternatifs doivent se transmettre dans le vide sans perte appréciable.

En somme, pour des fréquences de courant comparables à

1. Le lecteur fera bien à ce sujet d'accorder quelque attention à toutes les considérations très simples exposées précédemment sur le véritable rôle des isolants et sur les courants de haute fréquence (voir p. 285 et suivantes).

celle de la lumière, les rôles auxquels nous sommes accoutumés avec les courants continus ou peu rapidement variables, seraient retournés : les isolants, le vide, seraient d'excellents conducteurs et les métaux des isolants parfaits !

Nous voici préparés à apprendre que ces vibrations électriques hypothétiques à fréquence très grande, à l'aise comme chez elles dans le vide des espaces interplanétaires, ce sont précisément les ondes lumineuses !

Production des ondes hertziennes. — Le dispositif employé par Hertz pour lancer dans l'espace des ondes électriques comparables aux ondes lumineuses est représenté par la figure 212.

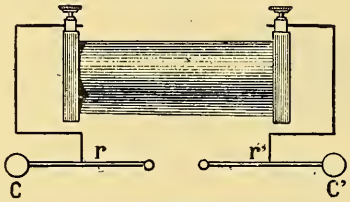


Fig. 212. — Dispositif de Hertz.

Les deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff sont reliés à deux tiges métalliques *rr'* de 1 mètre de long, placées dans le prolongement l'une de l'autre et terminées aux extrémités en regard par deux boutons métalliques très proches, aux extrémités opposées par des sphères C, C' de 15 centimètres de diamètre.

Sous l'effet des émissions successives de la bobine, des étincelles éclatent entre les deux boutons à chaque battement du trembleur, et chacune d'elles provoque un flot d'oscillations électriques d'une énorme fréquence.

Pourquoi des oscillations ?

Je vous demanderai à cet égard de vous reporter aux dispositifs et aux explications très simples de la page 296. Si, à première vue, l'analogie avec le dispositif de Hertz n'est pas évidente, je vous ferai observer que les tiges *r r'* présentent, comme tout conducteur, une certaine self-induction (p. 253); que les boules C, C' constituent, en réalité, les armatures d'un

condensateur dont le diélectrique — ceci n'est plus pour nous surprendre — n'est autre que *l'air qui les sépare*. Figurez par les signes conventionnels habituels cette capacité et cette self-induction, et vous transposez le dispositif de Hertz sous la forme de la figure 213, qui n'est, vous pouvez le vérifier, que la reproduction exacte du dispositif de Tesla; les effets produits doivent donc être les mêmes, à cela près que self-induction et capacité étant ici microscopiques, la rapidité des oscillations atteindra des valeurs énormes : c'est précisément ce que désirait l'expérimentateur qui, cherchant à dévoiler l'identité des ondes électriques et lumineuses, devait se rapprocher autant qu'il le pouvait des fréquences énormes mises en jeu par celles-ci.

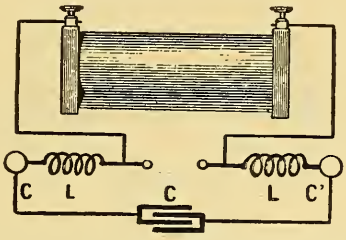


Fig. 213. — Mécanisme de la production des oscillations dans le montage de Hertz.

De fait, Hertz atteignit du coup avec cet appareil au chiffre de 4 à 500 millions d'oscillations par seconde; ses successeurs ont porté à *cinquante milliards* ce chiffre déjà respectable! Certes, nous sommes encore loin de compte, et, pour impressionner notre œil, il faudrait aller *dix mille fois* plus vite encore. Pourtant ç'a été suffisant pour conduire à de mémorables résultats l'illustre physicien.

Bien que le secours des hautes mathématiques soit ici fort puissant pour fournir un compte exact des phénomènes, ceux-ci sont trop importants pour que je n'essaie pas d'en expliquer le mécanisme d'une façon élémentaire.

Nous venons de dire que l'espace entre les sphères C et C' constitue le diélectrique d'un condensateur à travers lequel se ferment les courants alternatifs de la décharge oscillante. Nous pouvons concevoir cet espace comme découpé en minces filets conducteurs (*fig.* 214), allant d'une sphère à l'autre et dont

chacun est le siège d'un courant alternatif, balancement longitudinal rythmé sur la période très rapide de la décharge oscillante [1].

Considérons les choses après un instant *très court* de fonctionnement.

Nous ne pouvons pas admettre que ce système de lignes de force électriques s'est établi et développé instantanément jusqu'à l'infini : rien n'est instantané dans la nature, et pour *tendre* quoi que ce soit, fut-ce de l'éther, il faut un certain temps, si petit soit-il. Donc, à cet instant, il existe une ligne de force L qui, dans le plan que nous considérons, forme la limite extrême de l'espace électrisé.

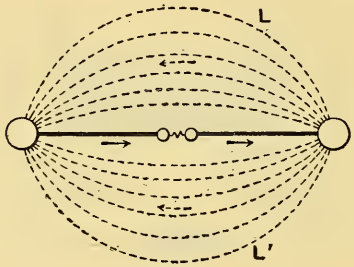


Fig. 214. — Propagation des courants dans l'espace entourant l'oscillateur de Hertz.

Celui-ci va-t-il s'en tenir là ou va-t-il au contraire gagner du terrain ?

Pour répondre à cette question, n'oublions pas que cette ligne électrique limite, et celles qui l'avoisinent, sont siège de courants alternatifs extrêmement rapides ; or nous savons très bien — l'exemple des transformateurs (v. p. 271) est là pour nous le rappeler — qu'un conducteur traversé par des courants alternatifs *induit* des courants de même fréquence dans les conducteurs voisins.

Qu'est-ce à dire ? Les conducteurs parallèles voisins, ici, ne nous manquent pas, puisque pour nos courants si rapidement variables l'espace tout entier est conducteur ! Donc il est fatal

1. Ce système de *lignes de force électriques* doit être complété par un système analogue et inséparable de lignes de force magnétiques, que nous connaissons bien (v. p. 160), et qui existent ici sous forme de cercles concentriques aux tiges *rr'*.

que les filets au-delà de L, non encore contaminés, seront à leur tour parcourus par des courants de même période et que de proche en proche l'espace sera gagné par le mouvement vibratoire, avec cette condition très favorable que l'énergie électrique ne se dégradant pas ici en chaleur (v. p. 379), pourra se propager très loin [1].

Si au lieu de considérer une seule direction, nous considérons l'espace tout entier, cette propagation se fera par couches enveloppantes successives qui affecteront bientôt — et une fois de plus — la forme de sphères rapidement gonflées, la vitesse de propagation n'ayant pas de raison (à supposer l'appareil isolé dans l'espace) de différer suivant la direction.

Remarquons que, lorsqu'une couche de l'espace est gagnée par le mouvement vibratoire, le courant qui y est induit résulte de l'action inductrice de toutes les couches voisines déjà actives : or cette action résultante n'atteint la couche suivante *qu'un peu plus tard*, puisque la propagation n'est pas instantanée ; le balancement induit dans cette couche retarde donc sur le précédent, et retarde d'autant plus que les deux couches considérées sont plus distantes :

Le retard, en particulier, est évidemment (en régime) d'une oscillation entière entre deux couches assez distantes pour que la propagation mette juste le temps d'une oscillation du courant à aller de l'une à l'autre ; cette distance constitue ainsi (V. p. 367) la *longueur d'onde* du phénomène tout à fait analogue à la propagation des ondes lumineuses que nous révèle notre analyse.

Il résulte en effet de celle-ci qu'il faut se représenter dans leur ensemble nos couches sphériques successives comme *glissant*, comme *oscillant transversalement* les unes par rapport aux autres : si l'on cherche à se rendre compte de ce qui se passe à partir du centre de la propagation dans une direction quelconque, l'effet est analogue à celui qu'on peut constater sur

---

1. Il nous suffit, et, très modestement, nous nous en contenterons, de constater que la propagation est inévitable. Quel est le pourquoi de cette propagation ? ceci, c'est une autre histoire. Les mathématiciens, très au courant du fait par leurs savantes équations, sont fort embarrassés de s'en expliquer au commun des mortels.

une fête lorsqu'une longue théorie de balançoires en mouvement, chacune un peu en retard sur la précédente, accomplit l'ensemble de son mouvement en une courbe onduleuse.

Dans ces conditions, un rayon qui, parti du centre d'ébranlement, suit la direction de la propagation — la ligne des balançoires dans notre comparaison — participe à ces retards successifs des couches sphériques oscillantes et, comme une corde secouée à l'un des bouts, il se propage suivant une ligne ondulée dont la période est justement celle des oscillations de l'appareil de Hertz. Un *rayon électrique* se propage ainsi exactement de la même façon qu'un rayon lumineux[1] (Voir p. 367).

Mesure de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation des ondulations électriques. — Voilà donc tout l'espace autour de l'oscillateur découpé en ondes sphériques prenant leur vol vers l'infini. Il s'agit de déterminer la vitesse avec laquelle elles vont effectuer ce voyage sans retour.

Comment?

D'abord nous ne voyons pas les rayons hertziens. Il faut avant tout pouvoir les déceler. Or, tout le milieu dans lequel se propagent les ondes se trouve dans un état spécial. De deux objets métalliques *quelconques* approchés l'un de l'autre jaillissent des étincelles. On augmente la sensibilité de ce *détecteur* en employant un fil recourbé dont les deux extrémités sont très voisines et dans lequel s'induit une f. é. m. surexcitée par la résonance (p. 327), si les dimensions sont convenables par rapport à la fréquence de la décharge oscillante : c'est le *résonateur* de Hertz.

Rappelons maintenant que, tout à fait analogues à celles d'un pendule, les oscillations d'un système à self-induction et à capacité sont soumises aux mêmes lois (p. 328); leur rapidité se calcule fort aisément par des formules analogues si

---

1. Sauf en ceci qu'un rayon électrique hertzien est nécessairement *polarisé :* le balancement des couches successives, en effet, étant toujours dirigé d'une boule à l'autre de l'oscillateur, le plan des vibrations d'un rayon passe toujours par les tiges de l'oscillateur, au lieu de varier sans cesse, ce qui est le cas de la lumière naturelle. Nous verrons ce phénomène, grâce aux antennes, valoir ses succès à la télégraphie sans fils (p. 389).

l'on connaît la self et la capacité agissantes. Hertz a ainsi pu prévoir que son oscillateur devait lui fournir 500 millions d'oscillations environ par seconde.

Donc, si nous parvenons à déterminer la longueur d'onde de la propagation, en multipliant par 500 millions, nous aurons la vitesse de cette propagation. Une fois de plus nous sommes amenés à mesurer la longueur d'onde, et une fois de plus le phénomène des interférences (p. 370) va nous en fournir le moyen.

Recevons nos ondes électriques, nos sphères grossissantes, sur un plan métallique (*fig.* 215). Ici, paradoxe pour nos vieilles idées encore mal extirpées (v. p. 377); si ce plan était une lame de verre ou de cristal, une muraille de résine ou de

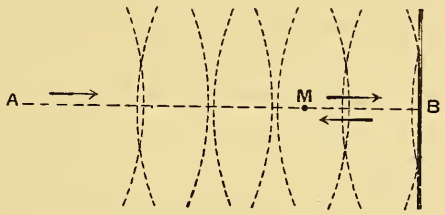


Fig. 215. — Réflexion des vibrations électriques sur un plan métallique ; production de ventres et de nœuds.

gutta-percha, alors, simple prolongement diélectrique de l'espace, l'obstacle serait franchi à l'aise par l'ondulation; mais ce plan en métal est, pour ces vibrations très rapides, imperméable (p. 379); ne nous étonnons donc pas de le voir se comporter comme un obstacle, et *repousser comme un miroir* ces vibrations rapides.

Remarquons, en passant, que la lumière elle-même ne se comporte pas autrement à l'égard d'un miroir métallique : c'est une nouvelle preuve d'une parenté qui ne va plus tarder maintenant à s'affirmer définitivement.

Donc nos vibrations électriques, après avoir choqué le miroir, rebroussent chemin : le rayon AB qui a touché le miroir normalement refait en sens inverse exactement le chemin parcouru à l'aller. Comment vont se comporter les molécules d'éther situées sur le chemin commun, qui ont à répondre si-

multanément aux vibrations transversales du rayon venant de A est de celui venant de B après réflexion? Comme dans le cas de la lumière (p. 371), ces molécules vibreront plus fort s'il y a concordance des deux mouvements au point considéré, et ce point M sera un *ventre*, décelé par des étincelles *plus fortes* au résonateur de Hertz; elles ne vibreront pas du tout s'il y a discordance complète, et le point correspondant sera un *nœud*.

Or, si ce point M est tel que la distance d'aller-retour MB + BM est d'un nombre exact de longueurs d'ondes, la vibration repassera toujours par M au même point de sa période qu'à l'aller; les deux actions seront toujours concordantes, et M sera un ventre, point de maximum d'étincelles[1]. Deux ventres successifs seront dès lors distants d'une quantité telle que l'aller-retour du rayon soit augmenté de l'un à l'autre d'une longueur d'onde, c'est-à-dire qu'ils seront distants d'*une demi longueur d'onde*. Il suffira de mesurer leur distance grâce au résonateur de Hertz, puis de la doubler, pour obtenir la longueur d'onde[2].

Dans ses expériences mémorables, Hertz remporta un premier succès : il constata effectivement, conformément à nos prévisions, la présence de ventres et de nœuds au voisinage d'une paroi réfléchissante. Il trouva de plus que les ventres successifs produits par son oscillateur étaient distants de 30 centimètres. D'où, pour la longueur d'onde, 60 centimètres; d'où, pour la vitesse de propagation, 0,60 × 500 millions, soit 300 millions de mètres par seconde. C'est exactement la vitesse de la lumière!

Quel magnifique succès pour le grand principe de l'unité des forces physiques!

---

1. Ce raisonnement n'est pas tout à fait exact. Le fait de la réflexion introduit dans le mouvement de l'onde réfléchie un petit retard qui peut aller jusqu'à 1/2 oscillation et déplace d'un quart de longueur d'onde l'ensemble des ventres et des nœuds.

2. Ce raisonnement est évidemment applicable aux ondes lumineuses, pourquoi donc n'employons-nous pas dans ce cas une méthode si facile? simplement parcequ'avec des ondes aussi courtes que les ondes lumineuses, les ventres successifs y seraient si rapprochés (moins de 1/2 millième de millimètre) que les bandes seraient invisibles. D'où l'artifice de la réflexion oblique, qui amplifie énormément le phénomène.

Ainsi, comme la lumière ou la chaleur, l'électricité constitue un mode de vibration de l'éther, se propageant à la vitesse de 300.000 kilomètres par seconde; comme les rayons lumineux, les radiations électriques sont capables de se réfléchir, d'interférer entre elles. On peut répéter avec elles — et on ne s'en fait pas faute — toutes les expériences de l'optique. Seule la fréquence diffère. Comme les différentes notes de la musique, ondes électriques, calorifiques, lumineuses ou chimiques sont les différentes sœurs d'une même famille!

Ainsi encore, tous les raisonnements ci-dessus sont parfaitement à leur place dans cet ouvrage, non seulement parce qu'ils sont ennuyeux, mais encore parce que, quand nous nous occupons d'optique, c'est en réalité de l'électricité que nous faisons.

TÉLÉGRAPHIE SANS FILS

Rien ne satisfait les électriciens d'aujourd'hui.

L'électricité les a accoutumés à tant de tours de force que tous les jours ils lui demandent davantage.

Les premiers télégraphistes confiaient leurs messages à des circuits électriques complets, constitués par deux fils, l'un pour l'aller du courant, l'autre pour son retour. Mais on n'a pas tardé à s'apercevoir que la terre pouvait être employée pour remplir ce dernier rôle, que, même à des milliers de kilomètres, le courant n'était pas embarrassé le moins du monde pour trouver son chemin à travers la terre et revenir fidèlement à son point de départ : le fil de retour a disparu de la télégraphie.

Aujourd'hui, on pense que c'est encore trop du fil d'aller; on trouve que ce fil unique est presque aussi ennuyeux à lui tout seul que les deux de l'ancien régime, puisqu'il faut pour l'établissement de la ligne presque le même travail, que celle-ci est à la merci d'un coup de vent, d'un orage, d'un régiment ennemi.

Bref, ce survivant des procédés d'autrefois est un pelé, un galeux : on voudrait bien le supprimer.

On a déjà fait beaucoup de tentatives dans ce but, mais les plus nombreuses consistaient à perfectionner l'emploi de la terre comme conducteur et à la faire servir à la fois à l'aller et au retour du courant.

Rien de tout cela n'est fort sérieux.

La véritable télégraphie sans fils repose sur le principe bien plus intéressant de la propagation des ondes électriques à travers l'espace. Les mémorables expériences que nous venons de rapporter en ont fourni la base essentielle.

Tube de Branly. — Nous avons vu que le procédé employé par Hertz, pour déceler à distance les ondes électriques, consiste à exposer à leur action un *résonateur*, entre les deux petites boules duquel jaillissent des étincelles provoquées par le choc des ondes électriques.

Ce mode d'investigation devient impuissant à quelques dizaines de mètres, et, réduite à cette maigre ressource, la télégraphie sans fils eût traîné une existence plutôt misérable.

Mais un autre procédé, d'une sensibilité incomparablement plus satisfaisante, a été imaginé et permet de déceler les ondulations à *deux mille kilomètres* de leur point d'émission. C'est le chiffre d'aujourd'hui, que celui de demain éclipsera sans doute.

Ce procédé, mis en pratique par MM. Marconi, Popoff, Tissot, et *tutti quanti*, est basé sur les travaux de notre compatriote M. Branly.

M. Branly a constaté que des tubes pleins de limaille métallique opposent au courant d'une pile une très grande résistance dans l'état ordinaire, mais perdent brusquement la presque totalité de leur résistance lorsque l'onde électrique hertzienne vient les frapper. L'effet produit est permanent et persiste après la disparition de l'onde jusqu'au moment où le tube, le *cohéreur*, reçoit un choc qui détruit la sorte d'orientation, de cohésion infligée aux particules métalliques par le passage de l'onde.

Si donc un système producteur d'oscillations de haute fréquence, même très éloigné, produit des ondes se propageant dans toutes les directions, un second système placé très loin

et comportant un galvanomètre, une pile et un cohéreur, décèlera leur passage par une forte déviation du galvanomètre.

Un récepteur comme celui-là, d'ailleurs, ne serait pas suffisant pour les besoins de la télégraphie, car un message comporte une série assez longue d'émissions, dont le galvanomètre ne pourrait signaler que la *première*, puisque, avons-nous dit, l'effet de l'onde électrique sur un cohéreur persiste indéfiniment.

M. Lodge a levé élégamment cette difficulté : le courant qui actionne le galvanomètre actionne en même temps, par l'intermédiaire d'un électro, un petit marteau qui vient choquer le cohéreur, en fait disparaître la conductibilité, et le met en état de signaler le passage de l'onde suivante.

En résumé, un système complet de télégraphie sans fils comporte un dispositif à haute fréquence du genre de celui de Hertz, complété par une *antenne*, tige métallique verticale de hauteur croissante avec la distance de transmission, reliée à l'une des boules de l'excitateur et dont le rôle est de faciliter la diffusion des ondes électriques tout en la polarisant dans des plans verticaux (p. 384) pour faciliter leur collection par l'antenne réceptrice, également verticale. Ce circuit transmetteur est alimenté par une bobine Ruhmkorff dont le primaire comporte un manipulateur Morse et qui envoie dans l'espace, à chaque abaissement de la clef, un *flot* d'oscillations dont la durée est précisément égale à celle de l'abaissement de la clef.

Quant au récepteur, c'est un simple cohéreur muni d'une antenne analogue à celle du poste transmetteur, et faisant partie d'un circuit comportant une pile et un récepteur Morse ordinaire. Dans les derniers appareils de Marconi, cependant, le cohéreur est remplacé par un récepteur bien plus sensible et bien plus sûr encore, basé sur une curieuse remarque relative à l'hystérésis du fer.

Avec les perfectionnements journaliers indiqués par les essais, on a petit à petit amélioré les résultats, franchi des distances plus considérables.

M. Marconi, dans ses premiers essais, faisait péniblement

franchir à ses signaux les 5 kilomètres du canal de Bristol. Aujourd'hui, certains navires de la flotte transatlantique peuvent rester en relation avec la terre à 600 kilomètres de la côte, rentrer en communication avec elle 20 heures avant d'arriver au port, se servir en outre comme relais des navires plus voisins de la terre qu'ils peuvent rencontrer et arriver ainsi à ce résultat fantastique de rester en relation constante avec le monde civilisé. D'ailleurs, l'imagination des journalistes, qui paraissait aller un peu vite en mettant en avant la possibilité de la traversée toute entière de l'Atlantique par les signaux hertziens, n'aurait que devancé très peu la réalité, puisque des signaux très nets auraient été échangés entre l'Angleterre et Terre-Neuve.

Plus récemment, malgré la terre et les montagnes, qui jouent un rôle défavorable, un navire de la marine italienne serait resté en communication permanente avec le poste de Poldhu, en Cornouailles, depuis Cronstadt, aux portes de Saint-Pétersbourg, jusque dans la Méditerranée ! Il est vrai que ce poste de Poldhu, chef-d'œuvre de Marconi, est une effrayante usine d'énergie mettant en branle l'éther environnant sous la poussée de plusieurs milliers de chevaux !

Ces résultats merveilleux, acquis au prix d'une ténacité et d'une ingéniosité vraiment méritoires, justifient certainement l'enthousiasme des Italiens à l'égard de leur jeune compatriote. Il est seulement regrettable, pour l'avenir de la télégraphie sans fils, d'avoir à noter l'insuccès complet de recherches acharnées, tendant à assurer le secret des communications grâce à l'*accord* du récepteur sur le transmetteur, réalisé à l'aide des phénomènes de résonance. Jusqu'à nouvel ordre, les opérateurs sont à la merci du premier récepteur venu intercalé sur le trajet des ondes — c'est-à-dire n'importe où.

CHAPITRE DEUXIÈME

RAYONS CATHODIQUES ET RAYONS X

LA DÉCOUVERTE DE RONTGEN

La tâche admirable de Hertz est l'œuvre de 1888.

Passons à celle de 1895.

A cette époque, l'attention du public se portait avec passion sur une surprenante découverte qui venait d'ouvrir à la science des horizons nouveaux.

Un physicien allemand venait d'observer que de singulières radiations émises par un appareil dérivé du tube de Geissler étaient capables de traverser le corps humain et d'*illuminer vivement*, après ce singulier exploit presqu'aussi bien qu'avant, un écran saupoudré de platinocyanure de baryum. L'illumination, cependant, n'était pas uniforme : si les rayons qui n'avaient à traverser que les parties molles du corps franchissaient sans peine cet insignifiant obstacle, il en était autrement de ceux qui rencontraient sur leur route des parties dures, des os. Ces os, en effet, se montraient pour ces radiations un obstacle plus sérieux, de sorte que leur *ombre* apparaissait sur l'écran lumineux, qui fournissait ainsi une véritable image du *squelette* de la personne interposée !

Cette forme saisissante donnée à l'expérience, cette évocation brutale de l'image de la mort, qui a toujours le don — trop justifié, hélas ! — d'impressionner l'humanité, ne fut pas pour peu de chose dans l'immense retentissement de la découverte de Röntgen.

Pourtant, ces phénomènes venaient à leur heure.

Un autre physicien allemand, Lenard, avait conduit de façon remarquable une longue série d'expériences dont la découverte de Röntgen n'avait été que la suite logique; mais, présentés trop scientifiquement pour frapper les profanes, ces travaux n'avaient pas suffi à mettre en lumière le nom de leur auteur, et ce ne fut pas trop de tout l'engouement provoqué par

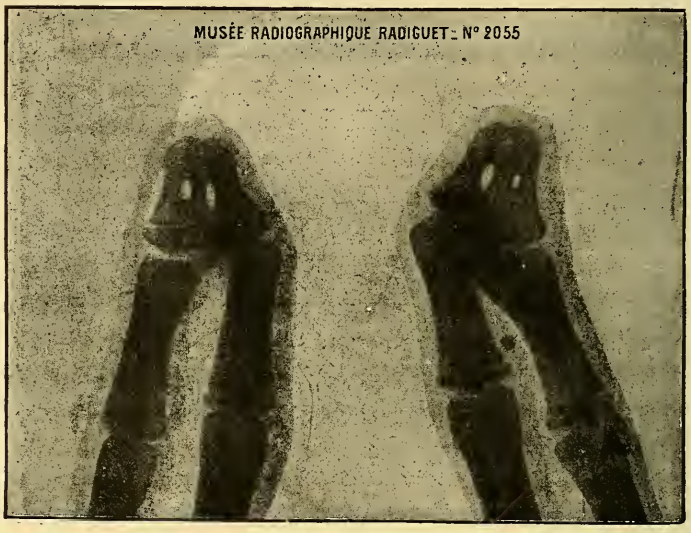


Fig. 216. — Cliché radiographique. Curiosité physiologique : doigts doubles chez une jeune fille de quinze ans.

Röntgen pour révéler même à beaucoup de savants la tâche remarquable accomplie par Lenard.

Il faut convenir toutefois qu'au point de vue pratique, la forme originale et saisissante de l'expérience de Röntgen devait fournir immédiatement à la nouvelle découverte sa plus remarquable application. Grâce à elle, il est devenu possible à l'œil de fouiller au plus profond de l'être humain, d'en saisir l'anatomie, d'en pénétrer les imperfections et les lésions; le diagnostic des médecins, en beaucoup de cas, y a gagné en sécurité, le scalpel des chirurgiens peut être désormais dirigé avec sûreté vers les corps étrangers incrustés aux profondeurs des chairs...

Si les profanes furent « ébahis » de cette découverte, cela se conçoit. Le plus extraordinaire, c'est que les savants ne l'apparurent pas moins. Généralement, quand les savants perdent leur latin à l'étude d'un phénomène, ils le baptisent d'un nom suffisamment grec pour faire croire aux âmes simples que ledit phénomène n'a plus de secrets pour eux. Ici, leur étonnement fut tel qu'ils oublièrent de le dissimuler et qu'en un aveu dépouillé d'artifices, ils baptisèrent *rayons X* les nouvelles radiations.

A l'heure actuelle, il faut le dire, cet étonnement s'est quelque peu calmé et les idées des physiciens sur le sujet se sont un peu assises : ce n'a pas été un mal, car, si ce terrain ne s'était pas trouvé par bonheur quelque peu exploré, la secousse bien autrement violente que le radium vient de se permettre à leur égard aurait encore été plus rude.

Le moment est donc venu pour nous de voir en quoi consistent les idées qui ont cours aujourd'hui relativement à ces rayons.

Et d'abord, comment les produit-on ?

Du tube de Geissler à l'ampoule de Crookes. Tubes de Cooper Hewitt. — Parmi les corps les plus imperméables au courant continu, parmi ceux qui justifient le mieux l'incorrect qualificatif d'*isolants* (Voir p. 377), les gaz figurent au premier rang.

Toutefois, en s'y prenant bien, rien n'est plus aisé que de faire subir à cette faculté isolante des gaz une bien curieuse atténuation : il suffit de les *raréfier* en les soumettant à l'action d'une pompe à vide très efficace.

Renfermons le gaz à étudier dans une ampoule de verre (*fig.* 217) munie à ses deux bouts de deux électrodes de platine reliées aux pôles d'une bobine de Ruhmkorff. Nous constatons que tout d'abord aucun courant ne passe. Si, par un petit ajutage, on pompe progressivement le gaz, le courant persiste à ne pas passer ; mais il arrive pourtant un moment où la masse gazeuse s'emplit silencieusement de *lueurs étranges*. Ces lueurs sont l'indice que le gaz, dépouillant enfin son intransigeance, se laisse traverser par le courant. Leur couleur dépend du gaz

renfermé dans l'ampoule : violacées dans l'air, elles sont vertes dans l'acide carbonique, rouges dans l'hydrogène, pourpres dans l'azote, magnifiques toujours.

Tel est le *tube de Geissler*, joie des collégiens, passion de pas mal de personnes enthousiastes des beautés de l'électricité, et l'expérience en question, si simple puisqu'elle n'exige qu'une bobine de très faible puissance, est effectivement l'une des plus belles de l'électricité.

La forme des tubes n'est pas sans influence sur l'apparence de ce magnifique phénomène.

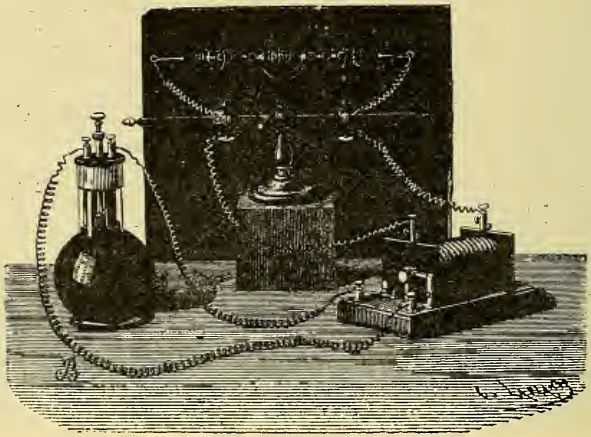


Fig. 217. — Tubes de Geissler.

Présentent-ils une succession d'étranglements et de renflements, la lumière affecte des aspects très variés : pâle et diffuse dans les parties élargies, elle se surexcite, augmente d'intensité dans les étroits défilés qu'elle est obligée de franchir : en même temps apparaissent des stries obscures qui forment un contraste du plus joli effet avec l'éclat des parties voisines.

La lumière des tubes de Geissler est bien loin de ressembler à celle des sources ordinaires : elle est d'une douceur incomparable ; les yeux en supportent l'éclat sans fatigue, et c'est avec surprise que si on vient à porter la main sur ces tubes enflammés, on les trouve froids : la lumière qu'ils émettent est de la lumière *froide*. Ce fait pourra sembler assez

extraordinaire aux personnes qui, l'esprit faussé par la barbarie de nos procédés habituels d'éclairage — où 99 centièmes et plus de l'énergie dépensée fournissent de la chaleur obscure (v. p. 116) — considèrent comme synonymes corps *lumineux* et corps *très chauds :* il a été cependant à peu près mis hors de doute par les recherches de M. Warburg, qui attribuent à la température du gaz lumineux des limites comprises entre 21 et 130°.

On peut conclure de ces essais que le tube de Geissler émet peu de radiations purement calorifiques et beaucoup de radiations lumineuses : c'est le « ver luisant » des électriciens et un avenir industriel important lui est sans doute réservé.

Il est même intéressant à ce propos d'ouvrir une parenthèse au sujet des remarquables résultats obtenus par l'Américain Cooper-Hewitt.

Ce physicien constitue des tubes de Geissler avec des électrodes de grande surface, l'une en fer, l'autre en mercure, et ces tubes doivent à la vapeur de mercure répandue dans leur atmosphère des propriétés toutes spéciales. Très résistant à froid, le système ainsi constitué, comme la lampe Nernst (p. 117), nécessite pour s'illuminer un amorçage préalable, qui est effectué ici à l'aide d'une décharge de haute tension. Le tube se remplit alors d'une lueur très vive en même temps que sa résistance intérieure diminue à tel point que les différences de potentiel de 100 à 110 volts de nos secteurs sont parfaitement suffisantes.

La complication de la haute tension nécessaire pour l'amorçage n'est qu'apparente, car, très habilement, l'inventeur a su mettre à profit pour réaliser cette tension un dispositif analogue à celui de la figure 148. Un électro-aimant placé en dérivation sur le tube est traversé par un courant intense, puis brusquement coupé ; il se produit une f. é. m. de self-induction très élevée qui provoque l'allumage : il n'y a donc aucune difficulté à brancher les tubes de Cooper-Hewitt aux lieu et place des lampes à incandescence.

La lumière que dégagent ces appareils est très intense ; elle se compte par dizaines de bougies et non plus par dixièmes

comme celle des tubes de Geissler classiques. Le rendement lumineux ressortirait au chiffre vraiment merveilleux de 0,5 watt par bougie et moins : on peut, semble-t-il, élever quelques doutes sur l'authenticité de ce rendement, en raison de la difficulté de comparer aux sources ordinaires la lumière toute spéciale des tubes Cooper-Hewitt. Nous touchons là, en effet, au point faible de cette remarquable invention : la lumière bleuâtre qu'elle émet est dépourvue de radiations rouges, à tel point que les lèvres des spectateurs paraissent noires et que les modifications apportées aux couleurs par cette lumière incomplète donnent aux visages et aux objets un aspect macabre et fantastique. On remédie en partie à cet inconvénient à l'aide d'écrans fluorescents appropriés ou par des lampes à incandescence ordinaires, qui complètent avec leurs radiations rougeâtres un ensemble plus harmonieux.

A cette jolie expérience des tubes de Geissler s'est borné en l'espèce pendant plusieurs années le bagage des physiciens. Pour illuminer le tube de Geissler, en effet, le vide assez médiocre des machines pneumatiques, soit environ le millième d'atmosphère, était suffisant.

Mais avec ces merveilleux outils modernes que sont les trompes à mercure, on peut avec une facilité extrême atteindre aux vides les plus fantastiques. Un simple robinet d'eau à tourner et, le lendemain, on trouve son récipient vidé jusqu'à la moelle, jusqu'aux parages invraisemblables du millionième d'atmosphère[1] !

Les physiciens, gens curieux, n'ont pas manqué de se demander ce que devenait la conductibilité des gaz poussés à ces raréfactions extrêmes.

C'est tout un monde nouveau qui s'est ouvert à eux !...

Faisons fonctionner à nouveau notre tube de Geissler à ampoule sphérique, mais, cette fois, examinons les choses de près (*fig.* 218).

Nous voyons qu'une colonne lumineuse rouge violacée part

---

1. Nous avons signalé précédemment (p. 115) un autre moyen bien plus expéditif encore d'arriver au même résultat.

de l'électrode positive ou *anode* et se dirige vers l'électrode négative ou *cathode ;* cependant, elle n'y aboutit pas : un espace obscur la sépare de celle-ci, qui est de son côté entourée d'une gaine violette plus ou moins volumineuse.

Mais raréfions davantage l'air du tube.

Voici que la lumière anodique augmente de volume ; mais en même temps voici qu'elle pâlit petit à petit, puis s'éteint pour un très haut degré de vide.

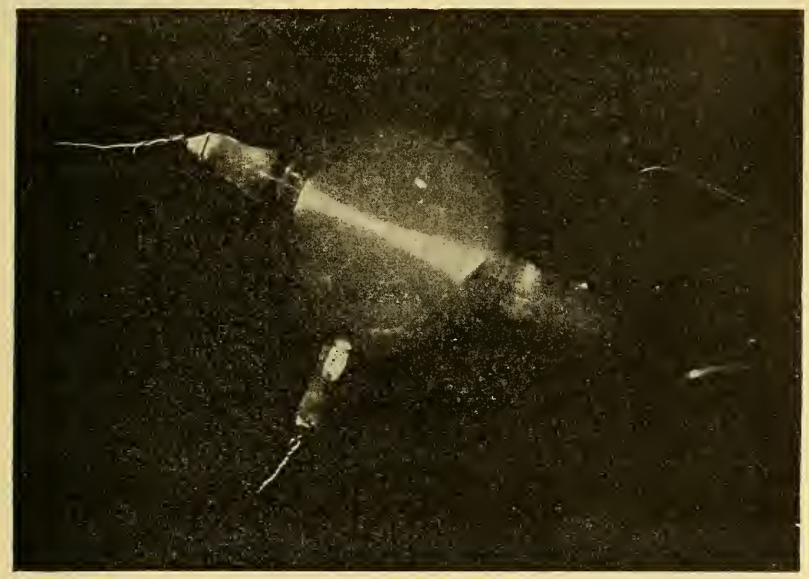


Fig. 218. — Le faisceau cathodique.

Par contre, la gaine violette de la cathode s'enfle progressivement et devient seule visible lorsqu'est atteint le vide extrême qui porte le nom de Crookes.

Et c'est ici que les surprises commencent !

Rayons cathodiques. Leurs propriétés. — De cette gaine cathodique partent des rayons, les rayons cathodiques, qui, *dans l'intérieur de l'ampoule* où ils sont produits, présentent les plus curieuses propriétés[1].

1. Hittorf, 1868.

C'est ainsi que ces rayons, peu visibles par eux-mêmes, et révélés à peine par une légère traînée lumineuse, ont la faculté d'illuminer, de rendre violemment fluorescents *presque tout ce qu'ils touchent!* Le diamant, le rubis, exposés à leur action, s'illuminent de mille feux, verts pour le premier, rouge vif pour le second; mais il n'est nullement nécessaire de recourir, pour produire ces effets, à des substances aussi précieuses : des corps infiniment plus vulgaires sont susceptibles d'effets tout aussi beaux, et, par exemple, le verre ordinaire brille de cette belle lueur vert jaunâtre que l'on peut voir dans les ampoules radiographiques en activité ; la craie donne une vive lumière d'un jaune orangé, les oxydes métalliques fournissent des colorations fort diverses : en les utilisant de

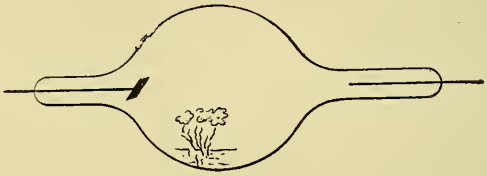


Fig. 219. — Bouquet artificiel s'illuminant par les rayons cathodiques.

manière à mêler leurs couleurs, on peut réaliser une ravissante expérience (*fig.* 219) en composant de véritables bouquets artificiels qui, incolores et ternes jusque-là, s'allument soudain de lueurs multicolores et délicates sous le souffle enflammé des rayons cathodiques.

D'autres expériences aussi curieuses ont l'avantage de laisser échapper sur la nature possible de ces étranges rayons quelques indications que la sagacité des physiciens n'a eu garde de laisser échapper.

Plaçons sur le trajet des rayons cathodiques les ailettes mobiles d'un léger radiomètre : cette ailette se met à tourner avec rapidité, révélant ainsi que le faisceau cathodique exerce sur elle une légère *pression*.

Concentrons maintenant le faisceau, à l'aide d'une disposition convenable de la cathode, sur une petite boule de platine disposée sur un support isolant convenable.

En un instant, le métal, isolé dans l'espace, est porté au rouge blanc !

Bombardement moléculaire. — Cette dernière expérience, surtout, paraît démonstrative. Elle appelle presque nécessairement l'hypothèse que l'émission cathodique n'est autre chose qu'une projection continuelle de *particules matérielles* lancées par la cathode avec une *énorme vitesse :* sous le choc répété de ces particules, la masse de platine rougirait de la même façon qu'un morceau de métal, martelé avec vigueur, arrive à s'échauffer jusqu'à l'incandescence.

C'est le *bombardement moléculaire* de Crookes[1].

D'autres constatations viennent renforcer cette opinion.

On a remarqué que ces rayons cathodiques exercent une action réductrice puissante sur les corps exposés à leur rayonnement : le cristal de l'ampoule est noirci par la mise en liberté de plomb métallique ; l'oxyde de cuivre est peu à peu transformé en cuivre ; le silicate cuivrique vert aboutit au silicate cuivreux rouge[2].

Ce serait la matière transportée par l'émission cathodique qui provoquerait ces réactions.

Chose bizarre, il paraît résulter de la nature de celles-ci que la substance ainsi véhiculée n'est constituée ni par le métal de la cathode, ni par le gaz de l'ampoule ! Chose plus curieuse encore, quel que soit ce métal ou ce gaz, l'action chimique en question est toujours *identique !* Que nous le voulions ou non, on le voit, nous nous enfonçons dans le mystère. Est-ce que par hasard l'énigmatique substance véhiculée par les rayons cathodiques serait toujours la même ?

Autres singularités.

Si la cathode bombarde sans cesse l'espace environnant, elle est elle-même le point de mire d'un autre bombardement presque aussi vigoureux, que rend tangible *son incandescence* si elle est formée d'une mince lame de platine. Si cette cathode est perforée de petits trous, une partie des projectiles qui

1. Crookes, *British Association*, meeting de Sheffield, 1879.
2. Villard, *Bulletin de la Société des Électriciens*, avril 1900, p. 177.

la bombardent, emportés par l'élan, passent à travers les trous et dépassent le but, comme le pourrait faire une bande d'oiseaux écervelés ! Leur projection en arrière de la cathode est en effet rendue tangible par une action chimique intense facile à déceler dans cette région de l'ampoule.

Tels sont les *kanalstralhen*, les *rayons-canaux* de Goldstein, qui auront tout à l'heure l'occasion de nous intéresser.

Électrisation des particules cathodiques. — Mesure de leur vitesse. — Cette hypothèse de la projection par la cathode de particules matérielles étant ainsi admise, il paraît évident que pour produire de tels effets, leur vitesse de projection doit être absolument énorme.

Nos physiciens, qui ne doutent plus de rien, se sont amusés à la mesurer.

Comment est-il possible de s'attaquer à pareil problème quand on sait les difficultés qu'éprouvent les artilleurs à mesurer les vitesses relativement si faibles de leurs projectiles ou les mécomptes des agents cyclistes dans l'évaluation des 20 misérables mètres par seconde de nos chauffeurs les plus excités ! C'est ce que nous allons voir.

Disons d'abord que — propriété qui n'est pas la moindre bizarrerie de l'émission cathodique — chacune des particules qui la constituent *est électrisée* — électrisée négativement. M. Perrin[1] a donné de ce fait une démonstration directe en recevant un faisceau de rayons cathodiques, dans des conditions convenables, sur un électromètre approprié — qui se charge aussitôt d'électricité négative.

Ce fait est extrêmement important : nous aurons d'autres occasions de nous en apercevoir. En tout cas, notons que nous retrouvons ici cette notion de particules électrisées ou *ions*, que nous avons déjà rencontrée en parlant de l'électrolyse (p. 133) et qui tend à prendre dans les idées des physiciens une importance de plus en plus grande.

Faisons passer ces particules électrisées — ou plutôt le faisceau cathodique que constitue, tel un feu d'artifice perpétuel,

1. *Comptes Rendus*, t. CXXI, p. 1130, 1897.

leur incessante projection — au voisinage d'un corps électrisé lui aussi.

Nous savons — se rappeler la sempiternelle boule en moelle de sureau et l'inévitable bâton de cire des traités classiques — que ce corps électrisé va exercer sur chaque particule, à son passage devant lui, une *attraction* ou une *répulsion*, suivant qu'il sera lui-même électrisé positivement ou négativement.

Le faisceau va donc être *dévié*

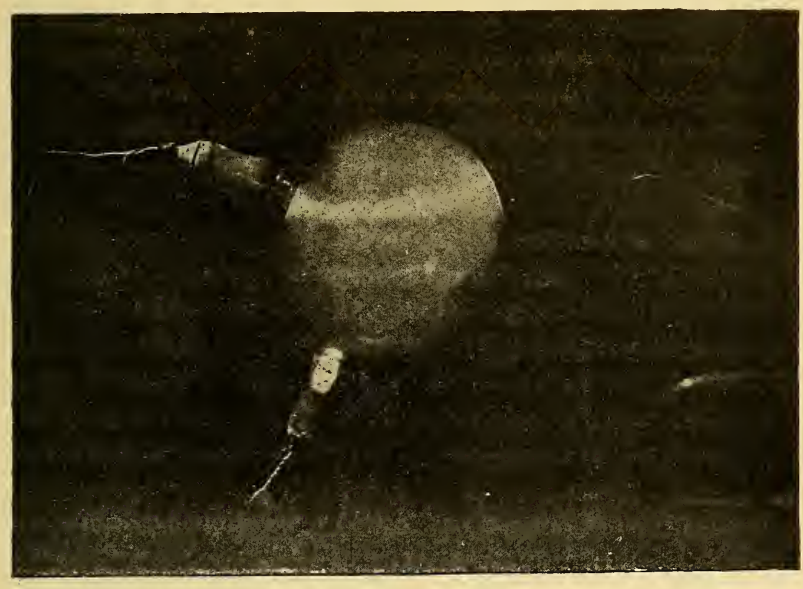


Fig. 220. — Déviation du faisceau cathodique dans un champ électrique

L'expérience montre qu'effectivement il en est bien ainsi, et que de plus la déviation est tout à fait appréciable; il est aisé de le constater, puisque ce faisceau est rendu visible par l'illumination des corps qu'il touche (p. 398) et que tous ses déplacements sont trahis par le déplacement de la tache lumineuse qu'il provoque sur l'ampoule.

Or, de prime abord, il est évident que cette action déviatrice doit être d'autant plus forte que les particules sont plus électrisées et moins lourdes, c'est-à-dire que le rapport de leur électrisation à leur masse est plus grand; d'autant plus petite au contraire que ces particules passent plus vite devant le corps

électrisé, donc échappent plus vite à son action. Ainsi, la déviation n'est pas quelconque, et sa valeur, *mesurée directement*, implique nécessairement une relation bien déterminée entre la vitesse des particules et le rapport de leur électrisation à leur masse.

Cette mesure nous met donc à la tête d'une équation à deux inconnues.

Mais, serait-on le plus savant mathématicien du monde, une seule équation, c'est un peu maigre pour tirer la valeur de deux inconnues. Heureusement, rien n'empêche le physicien de venir au secours du mathématicien dans l'embarras en imaginant une autre expérience dans des conditions différentes de la première et telle qu'il puisse en résulter une nouvelle relation entre les deux inconnues. En combinant cette seconde équation avec la première, rien ne sera plus aisé que de déduire les valeurs des deux inconnues.

Cette seconde équation, en l'espèce, c'est à un aimant que nous la demanderons.

En effet, la théorie et l'expérience indiquent qu'une charge électrique qui se déplace équivaut à un courant traversant un conducteur, et doit en conséquence subir de la part d'un aimant une action mécanique spéciale (Voir p. 219). Comme dans le cas précédent, le faisceau cathodique sera donc dévié par l'aimant d'une façon spéciale, mais qui dépend encore, pour des raisons aussi évidentes, de la vitesse et du rapport de la charge à la masse de nos corpuscules.

En *mesurant* encore la déviation ainsi produite, on se mettra donc en état d'établir une seconde équation, qui, combinée avec la première, déterminera séparément nos deux inconnues.

Un point, c'est tout.

N'est-elle pas suggestive, cette élégante simplicité avec laquelle un problème si difficile en apparence se trouve résolu !

Voyons maintenant les résultats.

Des deux inconnues que nous venons d'apprendre à déterminer, celle qui nous intéresse pour l'instant est la vitesse des particules. Cette vitesse, plusieurs séries d'expériences concor-

dantes indiquent pour sa valeur, suivant la grandeur de la différence de potentiel qui alimente le tube de Crookes, de 40.000 à 60.000 kilomètres *par seconde!*

Le chiffre n'est pas banal. Étant donnés, pourtant, les 300.000 kilomètres des rayons lumineux, peut-être seriez-vous tenté de le trouver mesquin?

Ce serait le tort que vous auriez!

Songez qu'entre ces deux modes de propagation, il y a une différence énorme : la lumière est produite par la simple transmission, sans déplacement de matière, d'une vibration sans poids et sans inertie, tandis que nos 60.000 kilomètres s'appliquent à une matière pondérable, à de véritables obus, *cent mille fois* plus rapides que ce que savent faire de mieux nos plus forts artilleurs!

Et, que cette matière pondérable soit de l'hydrogène ou toute autre chose, voici les résultats fantastiques que des calculs bien simples permettent de faire prévoir.

Un projectile dangereux. — On sait que dans tout corps en mouvement, balle de plomb ou particule gazeuse, la *force vive*, cette énergie latente qui, mise en liberté lors d'un arrêt subit, produit les terribles effets des catastrophes de chemins de fer ou les ravages des tempêtes, dépend du produit de la masse du corps en mouvement par le *carré* de sa vitesse[1].

Supposons qu'un des projectiles lancés par la cathode pèse *un milligramme :* fut-il en or, un poids d'un milligramme, dans les circonstances ordinaires de la vie, ne pèse pas lourd dans la balance de nos préoccupations.

En l'espèce, ce projectile possède une masse à peine 100 *milliards* de fois moindre qu'un train express de 100 tonnes.

Et pourtant, attendez!

A la vitesse de 60.000 kilomètres à la seconde, notre milligramme déambule assez exactement *deux millions de fois plus vite* que l'express en question à sa plus belle allure; le carré de sa vitesse est donc *quatre mille milliards de fois* plus grand.

1. Sauf pour les vitesses très voisines de celles de la lumière, pour lesquelles le radium a permis de vérifier une prévision de la théorie d'après laquelle l'énergie du corps en mouvement est encore bien plus grande.

Donc, tout compte fait, la force vive, l'énergie emmagasinée dans cette infime particule est $\frac{4.000 \textit{ milliards}}{100 \textit{ milliards}}$, soit 40 fois *plus grande* que celle détenue en pleine vitesse par l'express en mouvement!

D'où cette conclusion, dictée irréfutablement par les lois de la mécanique: si notre corpuscule voyageur était arrêté brusquement dans son essor par un obstacle suffisant — et ce n'est pas la tourelle de nos cuirassés qui y résisterait — il produirait le même bouleversement que 40 trains express se ruant à toute vitesse des différents points de l'horizon les uns sur les autres!

Le moyen, après cela, de s'étonner des allures un peu bizarres des rayons cathodiques?

Masse des corpuscules cathodiques. — Heureusement pour leur santé, les fabricants de rayons cathodiques n'ont pas à redouter de tels chocs. Par rapport aux particules lancées par la cathode, notre hypothétique projectile de 1 milligramme est beaucoup plus gros que la plus grosse bête de la création par rapport au plus infime microbe!

C'est ici le moment de rappeler nos calculs de tout à l'heure.

Nous avons vu en effet qu'outre la vitesse, ces calculs sont en mesure de nous fournir le rapport de la charge électrique à la masse de nos particules.

Ici encore, le résultat a stupéfié les physiciens.

Je ne veux pas prendre en traître mes lecteurs. S'ils veulent partager cet étonnement, ils devront le payer de l'absorption plutôt méritoire des pages ci-après.

On sait que, d'après la théorie moderne de l'électrolyse — esquissée ici même d'une main plutôt légère (p. 133), les particules dissociées pendant l'électrolyse d'un corps composé, les *atomes* des corps constituants, se rendent individuellement aux électrodes, chargés, comme nos projectiles cathodiques, d'une certaine quantité d'électricité.

On a pu, d'expériences précises, déduire la charge électrique ainsi transportée pendant l'électrolyse par chaque particule élémentaire, par chaque atome. Résultat bien instructif, qui ne fait d'ailleurs que traduire la loi de Faraday (p. 133), on a

pu constater que cette charge, indépendante de la nature de l'atome, est *absolument constante :* chaque atome d'un élément monoatomique, quel qu'il soit, hydrogène, potassium, argent, etc., transporte toujours la même quantité d'électricité dans le cheminement électrolytique.

Mais le poids d'un atome étant variable — dirait M. de La Palisse — suivant le poids atomique de l'élément considéré, la quantité d'électricité transportée *par unité de poids* sera d'autant plus grande que les atomes seront plus légers : elle atteindra son maximum pour l'hydrogène, dont les atomes sont de tous les plus légers connus. L'hydrogène est d'après cela celui de tous les corps qui, à poids égal, transporte le plus d'électricité pendant l'électrolyse.

Or nous avons appris comment il est possible de calculer dans le cas des corpuscules cathodiques ce même rapport de la charge véhiculée au poids transporteur ; il ne nous reste qu'à donner le résultat du calcul : ce rapport est *deux mille fois plus grand* que celui qui, en électrolyse, se rapporte à l'hydrogène !

Ici, la quantité d'électricité véhiculée paraît *absolument énorme* par rapport au véhicule.

Que conclure ?

Il semble que l'hésitation n'est pas permise.

Puisque, dans les idées professées jusqu'ici, l'atome représente le plus petit état de division réalisable de la matière, la seule conclusion possible, c'est que chaque particule cathodique est constituée par un ou plusieurs atomes, mais accompagnée d'une charge incomparablement plus forte que celle qui s'attache aux particules électrolytiques. Ceci, à tout prendre, n'aurait rien de trop révolutionnaire, étant donné le mécanisme si spécial de l'émission cathodique.

Cette explication n'a qu'un défaut, c'est d'être complètement fausse. Des expériences d'un tout autre ordre, signées J.-J. Thomson[1], le mettent en évidence. On peut se faire de ces expériences une idée approchée :

---

1. Je regrette de ne pouvoir, dans ce bref exposé, m'attacher comme elles le méritent à ces curieuses expériences et à la si intéressante *théorie des ions*, à laquelle M. Langevin, ancien élève de l'école de Physique et Chimie, professeur au Collège de France, a consacré de remarquables travaux.

Nous avons vu tout à l'heure que quand on reçoit dans des conditions convenables le faisceau cathodique dans un récipient en relation avec un électromètre, celui-ci se charge négativement. Sa charge totale, au bout d'un temps donné, représente naturellement la somme des charges individuelles apportées pendant ce temps par tous les corpuscules. Imaginons que nous puissions compter ceux-ci : la charge individuelle s'en déduira par une simple division.

Mais la cathode lance ses projectiles à raison de quelques milliards à la seconde, et ce dénombrement, à première vue, paraît plutôt scabreux !

Cependant, nous verrons tout à l'heure (p. 408) que, moyennant certaines précautions, les rayons cathodiques, d'ordinaire confinés dans l'ampoule où ils ont pris naissance, peuvent pénétrer dans l'air : si cet air est très humide, ils y provoquent un *brouillard* dont nous pouvons rendre la formation continue en renouvelant continuellement notre humide atmosphère. Chacune des gouttelettes qui constituent ce brouillard, a pour noyau *un de nos corpuscules électrisés*, de sorte que compter ces derniers revient... à dénombrer les gouttes. Voilà encore, en perspective, de quoi nous amuser !...

— Eh bien ! non, pas tant que vous croyez...

Ce brouillard est assez dense ; il tombe avec une vitesse que nous pouvons mesurer en arrêtant un instant le rayonnement cathodique et en suivant l'affaissement de la couche supérieure. Cette vitesse uniforme de chute implique pour les gouttelettes une grosseur bien déterminée, telle qu'à la vitesse de la chute, l'air oppose une résistance justement égale au poids de chaque globule. Il est donc aisé de calculer ce poids.

Comme, d'autre part, on peut mesurer le poids d'eau déposé par le brouillard par minute ou par heure, en divisant ce poids total par le poids d'une gouttelette, on a le nombre de gouttelettes et, par suite, le nombre de corpuscules projetés par la cathode. Pas à un ni à dix près, bien sûr, mais il ne s'agit pas de cela. Et voilà, sans grands frais, le problème résolu.

La conclusion de ces essais est infiniment intéressante : elle justifie amplement le mal que nous venons de nous donner.

La charge transportée par chaque corpuscule est *toujours la même*, quelle que soit la nature de la cathode, quelle que soit la nature du gaz de l'ampoule. Mieux encore : elle est précisément *égale* à celle véhiculée par les atomes dans le transport électrolytique !

Mais alors, comment donc expliquer la valeur deux mille fois plus grande du rapport de la charge à la masse de nos particules cathodiques? Il n'y a plus qu'une explication possible : puisque leur charge n'est pas plus grande, il faut bien que leur masse soit plus petite, *deux mille fois* plus petite que celle de l'atome d'hydrogène !

On voit d'ici quels symptômes de révolution se dégagent de ces expériences et menacent le vieil édifice de nos croyances touchant la constitution de la matière : nous nous imaginions que le fin des fins de la subdivision de la matière était l'atome; des générations de savants s'étaient évertués à calculer ses dimensions avec toutes les décimales nécessaires pour inspirer aux masses le plus profond respect — et voici que des particules deux mille fois plus légères que le plus léger des atomes connus nous sont révélées par l'observation des rayons cathodiques !

Quelle preuve, après tant d'autres, que l'infaillibilité n'est point de ce monde, que beaucoup de nos pas ne sont que des faux pas !

D'ailleurs, comme si la surprise n'était pas assez forte, nos infimes particules, nous l'avons dit, nous apparaissent comme toujours identiques en dimensions, en vitesse, en effets. N'est-ce pas là une étape peut-être décisive vers la matière type, constituante de tous nos atomes, vers le *pantogène* d'Hinrich et de Schutzenberger ?

Et, au contraire, si notre vision classique de l'atome disparaît, nous voyons se dessiner celle de l'*atome d'électricité*, de l'*électron*, puisque cette charge individuelle qui, en électrolyse, s'attachait aux atomes, se retrouve identique, accolée aux particules bien plus petites lancées par la cathode...

A moins qu'elle ne les constitue exclusivement, à moins que l'électron, comme nous en avons déjà exprimé l'hypothèse (p. 134) ne soit la matière elle-même, la matière originelle?...

Corpuscules positifs. — Hypothèse de Crookes sur la genèse des rayons cathodiques. — Pour compléter nos connaissances et nous mettre en état de jeter sur le phénomène un regard plus profond, il nous reste à nous occuper du bombardement auquel est soumise la cathode, de ces *kanalstralhen* que Goldstein a réussi à amener en arrière de la cathode en constituant celle-ci par une plaque perforée (v. p. 399).

En soumettant ces rayons à une étude analogue à la précédente, on voit qu'ils sont constitués par des corpuscules chargés *positivement*, beaucoup plus gros que les corpuscules cathodiques, *comparables à nos atomes*, et doués, enfin, d'une vitesse bien moindre, de l'ordre de 10.000 kilomètres par seconde.

L'ensemble de ces résultats rend fort vraisemblable la belle explication proposée par Sir W. Crookes sur la genèse des rayons cathodiques. Ceux-ci seraient produits par la rupture violente, sous l'action électrique, des atomes de gaz de l'ampoule voisine de la cathode : chacun d'eux, électriquement neutre, serait brisé en deux fragments ou *ions* d'électrisations contraires : l'un, l'ion négatif, violemment repoussé de la cathode au moment de la rupture, constituerait les rayons cathodiques, tandis que l'ion positif, beaucoup plus gros, représentant la presque totalité de l'atome, serait absorbé par la cathode et constituerait les kanalstralhen.

Observation des rayons cathodiques dans l'air. — Les effets des rayons cathodiques, jusqu'ici, nous les avons constatés à l'intérieur même de l'ampoule où ils étaient produits.

Vous vous doutez, en effet, que la nature matérielle de l'émission cathodique ne lui permet guère de franchir les obstacles sans subir tout au moins une modification profonde. Pour elle, en particulier, le verre de l'ampoule doit être infranchissable. C'est ce que l'expérience, d'accord — pour un coup — avec nos prévisions, démontre effectivement.

Pourtant, si l'obstacle est constitué seulement par une feuille d'aluminium extraordinairement mince fixée comme une fenêtre dans une ouverture pratiquée dans l'ampoule de Crookes, une partie des rayons cathodiques arrive à le franchir, quoique

l'air extérieur ne puisse pas pénétrer et compromettre le vide. Cette découverte a été faite par le célèbre Hertz et appliquée aussitôt à des recherches fécondes par Lenard, déjà nommé. Sans doute les particules cathodiques peuvent-elles, en raison de leur extrême ténuité et de leur vitesse énorme, traverser les atomes, qu'une théorie perfectionnée, loin de voir en eux les touts compacts que l'on imaginait, nous montre comme autant de systèmes solaires en rotation rapide (voir p. 464).

Quoi qu'il en soit d'ailleurs, il est certain qu'une partie de l'émission pénètre alors dans l'air. Les phénomènes de déviation électrique et magnétique conservent leur prise sur elle ; ils permettent de constater qu'elle y chemine d'abord avec une vitesse un peu plus faible que dans l'ampoule de Crookes, 10 0/0 en moins après le passage d'une lame d'aluminium de $0^{mm},01$ [1] ; comme avant, elle se montre capable d'exciter la fluorescence des corps les plus divers, etc. Seulement, la présence de l'air gêne considérablement la propagation des particules électrisées, de sorte qu'à un décimètre de l'ampoule, le faisceau cathodique est définitivement éteint.

Dans ce court trajet, toutefois, on peut déceler trois importantes propriétés.

D'abord les rayons cathodiques rendent l'air conducteur de l'électricité et lui donnent en conséquence la faculté de décharger les corps électrisés.

D'autre part, l'air irradié acquiert la faculté de faciliter la condensation des vapeurs : s'il est humide, un brouillard se produit près de la fenêtre de sortie. Nous avons vu (p. 406) de quelle heureuse façon ce fait a été mis à profit par M. J. Thomson.

Enfin ces rayons transforment en ozone l'oxygène de l'atmosphère.

LES RAYONS DE RONTGEN

Comment un expérimentateur heureux fait une grande découverte. — Tout ce que nous venons de dire était déjà

1. Des Coudres, *Physikal Zeitschrift*, novembre 1902.

à peu près connu des physiciens dès 1895, c'est-à-dire avant que la découverte de Röntgen n'eût révolutionné la science. Et en effet, nous n'avons pas dit un mot, jusqu'ici, des *rayons de Röntgen* ou *rayons X*, qu'il faudrait bien se garder de confondre avec les rayons cathodiques.

Röntgen répétait un jour dans son laboratoire de l'Université de Wurtzbourg les essais de Lenard, quand une observation inattendue le frappa de surprise.

Parmi les corps qu'il soumettait à l'action des rayons cathodiques pour en faire jaillir la fluorescence, un écran de platinocyanure de baryum se trouvait à proximité de l'ampoule de Crookes, laquelle, les observations en cours nécessitant une complète obscurité, se trouvait ce jour-là entièrement enveloppée de carton noir.

Or l'ampoule était à peine entrée en action sous le frémissement de la bobine de Ruhmkorff que le platinocyanure se mit à briller d'un éclat fort vif — pour s'éteindre subitement dès l'arrêt du courant. Une radiation émanée de l'ampoule venait donc frapper le platinocyanure et provoquer sa luminescence.

Mais cette radiation ne pouvait être confondue avec l'émission cathodique elle-même, parfaitement incapable, nous l'avons vu tout à l'heure, de franchir les obstacles placés sur sa route, verre de l'ampoule et carton noir : il s'agissait bien là de quelque chose de tout à fait nouveau.

Vivement intéressé — on l'eût été à moins — Röntgen chercha aussitôt à préciser les conditions de cette mystérieuse illumination.

Pour soustraire un instant à l'action de la radiation la substance phosphorescente et se rendre compte de la durée de sa luminescence, il eut l'idée d'interposer entre l'ampoule et l'écran une planche de sapin. Résultat inattendu : l'ampoule, imperturbablement, continua de briller.

En dépit de son épaisseur, un volume d'un millier de pages ne montra guère plus d'aptitude à troubler l'illumination.

Cela devenait fantastique.

Enfin, dans un mouvement accidentel, Röntgen, passant la

main devant l'écran, vit avec stupeur sur le fond lumineux *l'image de son squelette* se détacher en sombre!

Et j'imagine que sa surprise n'alla pas sans un frisson

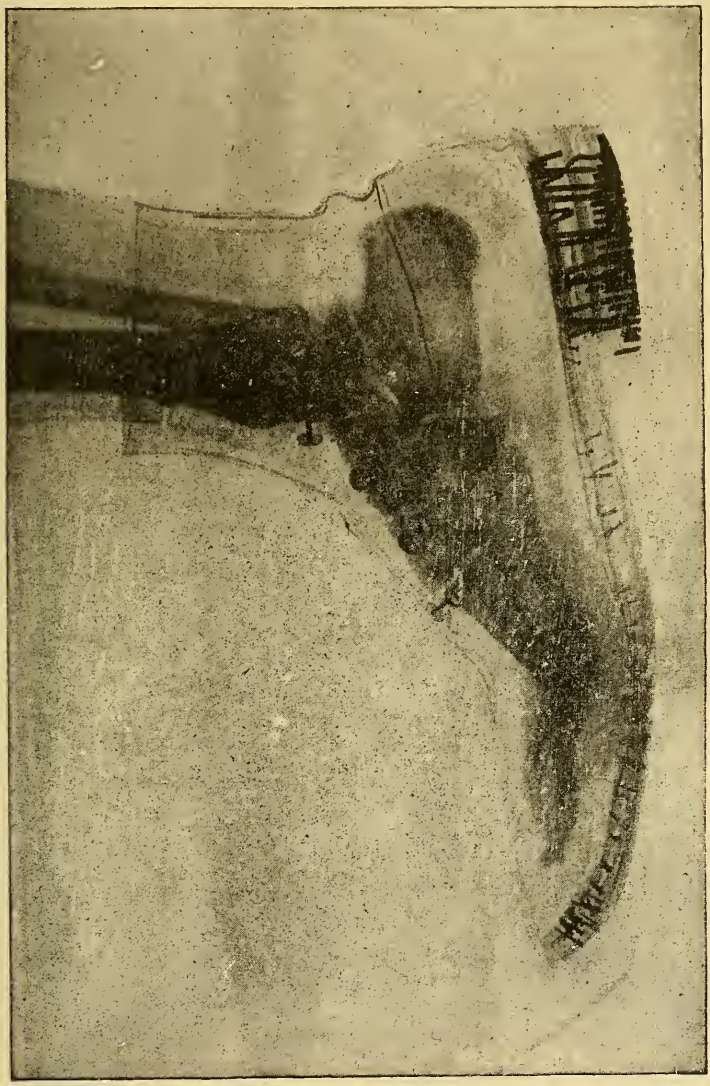


Fig. 221. — Curiosité radiographique un : pied dans sa chaussure.

d'épouvante ; j'imagine avec quelle hâte il s'évada de l'obscurité pour constater, avec un soulagement bientôt changé en enthousiasme, que son impressionnante vision devait toute son horreur aux surprenantes propriétés d'une nouvelle radiation!

Comment se forment les rayons X. — De ce jour mémorable, en tant qu'application industrielle, la *radioscopie* était créée ; mais son explication théorique restait à trouver. Perrin en France et, en Allemagne, Röntgen lui-même ne tardèrent pas à la fournir, plus simple certainement qu'on pouvait l'espérer.

Lorsque la balle d'un fusil vient s'aplatir sur une cible, la force vive qu'elle détenait est mise brusquement en liberté et se transforme en chaleur — en une chaleur suffisante pour porter à la fusion le plomb de la balle. Cette expérience montre que, conformément à nos idées sur la conservation de l'énergie, la force vive qui animait la balle n'est pas détruite et apparaît simplement sous une autre forme.

Eh bien ! lorsque les particules cathodiques viennent frapper comme autant de projectiles les parois de l'ampoule où ils sont produits, un phénomène du même ordre survient, compliqué et modifié, bien entendu, par l'énorme vitesse que nous savons et par l'électrisation de chaque particule. Comme dans l'exemple précédent, l'énergie cinétique ne peut être détruite, mais doit simplement se transformer. Elle devient en partie, comme tout à l'heure, de la chaleur : la preuve, c'est que le verre de l'ampoule s'échauffe énormément dans la région bombardée ; mais, pour une autre part, l'énergie libérée se manifeste par ces superbes fluorescences qui sont une manifestation si curieuse de l'activité cathodique.

Une dernière partie, enfin, se transforme en radiations particulières, qui sont précisément les rayons de Röntgen.

Ce mode de production est d'ailleurs général : chaque fois que des rayons cathodiques frappent un obstacle, cet obstacle devient aussitôt la source de rayons X.

Ceci ne nous dit encore rien sur la nature intime de ces rayons. Avant d'y venir, il est nécessaire d'être fixé sur leurs propriétés.

Propriétés et applications des rayons X. Radiographie. — Enfantés par eux, les rayons de Röntgen présentent avec les rayons cathodiques un certain nombre de traits communs.

Comme eux, mais à un moindre degré, ils excitent la fluo-

rescence, et nous avons même vu que c'est à ce fait qu'a été due leur découverte fortuite.

Comme eux, ils jouissent de la propriété de décharger les corps électrisés et de favoriser la condensation des vapeurs contenues dans l'air humide.

D'autre part, ils sont susceptibles d'amorcer des actions chimiques et, par exemple, d'impressionner des plaques photographiques, ce qui a permis à la *radiographie* de se superposer à la radioscopie.

Par contre, les rayons X se différencient des rayons cathodiques par plusieurs caractères essentiels : c'est ainsi que nous aurons beaucoup à insister tout à l'heure sur le fait très important que ni l'action d'un aimant, ni celle d'un champ électrique ne sont susceptibles de les dévier.

Mais l'un des plus intéressants parmi les caractères distinctifs des rayons de Röntgen est celui qui leur permet de traverser un très grand nombre de corps. Cette faculté de pénétration est d'autant plus grande que sont plus légers les corps traversés : le degré de transparence de ces corps paraît lié à la grandeur des poids atomiques de leurs constituants : une mince lame de platine est un obstacle bien plus sérieux qu'une plaque épaisse d'aluminium; les os doivent au poids moléculaire élevé des sels de calcium qui les constituent la presque opacité dont ils font preuve.

Il ne faudrait pas croire, d'ailleurs, que cette propriété suffise à elle seule pour justifier l'actuelle fortune industrielle de l'ampoule de Crookes. Pour provoquer celle-ci, il a fallu qu'une autre propriété absolument remarquable distinguât les rayons de Röntgen : ceux-ci, en effet, se montrent capables de traverser les corps sans aucune déviation, sans aucun de ces phénomènes de *réfraction* et de *diffusion* habituels aux rayons lumineux.

Si, comme ceux-ci, les rayons X déviaient pour ainsi dire au hasard de la route selon la densité des milieux traversés, les rayons transmis par les parties molles du corps empiéteraient sur les ombres portées par les os, et l'on n'obtiendrait sur l'écran que de vagues images, absolument inutilisables dans la plupart des cas.

Au lieu de cela, l'ombre géométrique des os se projette sur la plaque avec une sécheresse mathématique — à la condition que le faisceau parte d'une surface de petite dimension — et fournit un document d'une exactitude parfaite.

Perfectionnements dans la technique des rayons X. — On conçoit que les expérimentateurs se soient évertués à tirer de ce mode de documentation peu banal tout ce qu'il pouvait donner.

Les uns ont accumulé des perfectionnements qui ont centuplé la rapidité d'abord bien faible des plaques photographiques

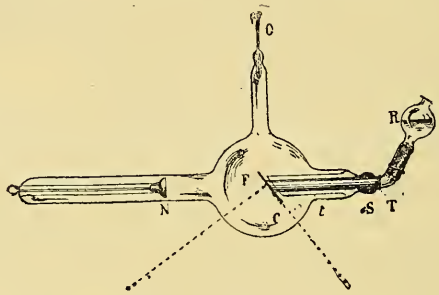


Fig. 222. — Tube de Crookes perfectionné (type Chabaud). L'anticathode F est refroidie par circulation d'eau, ce qui permet d'augmenter le courant d'alimentation et l'activité radiographique.

destinées à cet usage spécial. Le plus intéressant de ces perfectionnements a consisté à imprégner l'émulsion sensible de substances capables de devenir phosphorescentes aux points touchés par les rayons et de transformer ceux-ci, dont l'action chimique est relativement faible, en radiations violettes ou bleues, beaucoup plus actives.

D'autres opérateurs se sont préoccupés surtout des tubes de Crookes.

Dans les premiers, on se contentait de laisser le faisceau cathodique s'écraser sur le verre de l'ampoule. Celui-ci, peu approprié à ce rôle, s'échauffait rapidement, au point de *fondre* après un fonctionnement un peu prolongé. De plus, par cela même que la transformation était surtout calorifique et lumineuse, le rendement en rayons de Röntgen était plutôt médiocre.

Aujourd'hui, on opère autrement. On dirige le faisceau sur

une *anticathode* placée *dans* l'ampoule et constituée par un métal *lourd*, capable d'effectuer la transformation avec un bien meilleur rendement : Étant donnée la grande perméabilité du verre aux rayons X, il importe évidemment peu que ces rayons soient produits à l'intérieur de l'ampoule.

De plus, grâce à une disposition appropriée de la cathode, on peut concentrer le faisceau cathodique sur une anticathode de petites dimensions, qui se comporte comme une source lumineuse pour ainsi dire ponctuelle, donnant des ombres aux contours précis.

Enfin on a reconnu qu'un certain degré de vide bien déterminé est adéquat à l'obtention des meilleurs résultats : un degré de vide très élevé empêche presque le passage du courant (ampoules *dures*) ; un vide trop faible fournit au courant un passage très facile (ampoules *molles*), mais il y a peu de rayons de Röntgen : Un degré intermédiaire fournit les meilleurs résultats. Aussi les ampoules perfectionnées sont-elles munies d'un appendice tubulaire en platine qui, chauffé par une flamme, laisse dégager des gaz occlus pour mollir le tube s'il est trop dur.

Avec ces appareils perfectionnés, non seulement les os, mais certains organes peuvent être observés et étudiés, comme le cœur et les poumons : il est possible, par exemple, de constater l'attaque des poumons par la tuberculose et de suivre *de visu* les progrès de la terrible maladie.

D'autre part, d'abord enfantine, la technique expérimentale de la radiographie a songé sur le tard à s'inspirer des principes salutaires de la géométrie descriptive. La chose est assez simple. En radiographiant un sujet dans *deux* positions différentes, on peut localiser exactement l'emplacement de telle lésion ou de tel corps étranger, balle, fracture..., ce qui serait évidemment impossible avec une seule radiographie, puisque la profondeur de l'objet dans l'intérieur du corps serait indéterminée.

Action physiologique des rayons X. Radiothérapie. — Malgré des résultats aussi intéressants, les radiographes sont des gens fort à plaindre.

Au bout de quelques mois d'exercice, leurs cheveux, leur peau, leurs ongles font montre d'une fragilité tout à fait regrettable, s'envolant au moindre souffle, tombant à la première secousse. Cela manque d'autant plus de charme que des plaies très difficiles à guérir sont la conséquence de cette action physiologique bizarre. Les journaux nous ont appris récemment l'épouvantable mort d'un aide d'Edison, rongé morceau par morceau par l'ampoule cathodique. L'inconvénient est d'importance pour les jolis garçons soucieux de leur physique, et la pratique de la radiographie n'est pas à leur prôner.

Heureusement, l'effet de cette énigmatique action est excessivement lent et les patients qui, pour un examen de quelques minutes, sont justiciables des rayons de Röntgen n'ont aucunement à craindre d'échanger contre un pire le mal qui les tient.

Il faut ajouter que, comme il était inévitable, on a imaginé que doués de telles propriétés, l'emploi des rayons X dans l'art de guérir était tout indiqué. Le traitement du cancer et du lupus, spécialement, a été envisagé. Cette question est toujours à l'étude ; des résultats assez divers, souvent encourageants, ont été obtenus, et il serait encore prématuré de formuler une conclusion.

Que sont les rayons X ? — Si la transparence des obstacles matériels aux rayons X a été pour ceux-ci le point de départ de leur avenir industriel, elle constitue pour les physiciens un fait au moins aussi intéressant.

Il est bien improbable en effet qu'une projection de particules matérielles soit susceptible de traverser sans altération d'épaisses plaques de métal ou de bois.

Ainsi les rayons X ne constitueraient pas, comme les rayons cathodiques, la trajectoire de petits corpuscules.

Un fait capital déjà signalé (p. 413) vient à l'appui de cette manière de voir : pas plus que les rayons lumineux, les rayons X ne dévient de leur route, ni par l'action électrique, ni par l'action magnétique ; ils se différencient nettement à cet égard de rayons constitués par des particules électrisées, qui trouvent par contre dans leur déviabilité même un véritable et commode critérium.

Il est bien plus logique, dès lors, d'admettre que les rayons X représentent une modalité nouvelle du mouvement vibratoire immatériel d'où sont déjà issus la lumière et la chaleur.

Mais où devons-nous les classer? Faut-il simplement inscrire leur place quelque part dans le spectre solaire ou dans ses prolongements, du côté de l'ultra-violet, ou, au contraire, de celui des ondes hertziennes (voir p. 374), ou bien encore faut-il voir en eux une modalité tout à fait spéciale, une forme tout à fait inédite du mouvement de l'éther? Question embarrassante, qui a tenu les physiciens en haleine pendant de longues années.

Le phénomène des interférences, jugez-vous, doit fournir quelques indications? On ne s'est pas fait faute d'y penser.

Le malheur est que pour faire interférer des rayons, il faut, nous le savons, modifier leur route par la réflexion ou par la réfraction, de manière à les jeter les uns dans les autres.

Or :

Les rayons X ne se réfléchissent sur rien.

Pas davantage ils ne se réfractent (voir p. 413).

On ne peut donc pas les mêler les uns aux autres. Y réussirait-on, au surplus, qu'on ne serait pas plus avancé, nous allons le voir tout à l'heure.

Se fondant sur leur action chimique puissante, base essentielle de la radiographie, on en a fait pendant longtemps des rayons ultra-violets, d'autant plus que comme ceux-ci (p. 376) ils illuminent les corps fluorescents et provoquent la décharge des corps électrisés ; mais, dans cette hypothèse, leur passage en ligne droite à travers les obstacles est inexplicable : ils devraient être bien plus réfrangibles encore que les rayons violets, qui le sont extrêmement (voir p. 374).

La vérité est autre. Elle a été aperçue par le physicien anglais Stokes.

Nous avons vu chaque rayon X naître du choc contre un obstacle matériel d'un corpuscule cathodique lancé à toute vitesse (p. 412). Ce choc, au lieu de produire, comme un mouvement oscillatoire longtemps prolongé, des ondes sphériques incessamment renouvelées, des *trains d'ondes* comme on dit, produit une *onde isolée*, une onde solitaire. Celle-ci se propage dans l'espace avec la vitesse commune de toutes les perturba-

tions de l'éther, soit 300.000 kilomètres par seconde, mais elle n'offre nécessairement aucune des propriétés que les ondes lumineuses tiennent du fait même de leur répétition, de leur périodicité.

Les interférences sont nécessairement de celles-là, et il est donc naturel que les rayons X n'interfèrent pas.

La réfraction est aussi — cela se démontre — un caractère exclusivement dû à la périodicité : rien d'étonnant non plus à ce que, pour le plus grand bonheur des radiographes, les rayons X ne se réfractent pas.

Quelque étrange qu'il nous soit apparu dès l'abord — et sous les réserves formulées, page 407, sur le caractère précaire et provisoire de nos conceptions — le terrain est donc maintenant suffisamment déblayé : nous nous y orientons, somme toute, assez aisément, et nous allons pouvoir aborder avec beaucoup plus d'aisance l'étude bien plus troublante des substances radioactives.

CHAPITRE TROISIÈME

LE RADIUM

COMMENT LE RADIUM A ÉTÉ DÉCOUVERT

L'hypothèse de M. Poincaré et la découverte de M. Becquerel. — Les travaux sur le radium, qui ont mené si loin la science et les savants, ont eu comme maigre préambule un point d'interrogation posé sans conviction en 1896 par M. Poincaré[1].

Nous avons vu que lorsqu'ils viennent se briser sur le verre de l'ampoule de Crookes, les rayons cathodiques se muent en rayons X. Étant donné que simultanément un effet de fluorescence intense allume alors dans le verre une magnifique lueur verte, M. Poincaré, à une époque où ce qui nous paraît très simple semblait encore terriblement obscur, se demanda si cette fluorescence ne serait pas la cause même des rayons de Röntgen. Dans cette hypothèse, que nous savons maintenant inexacte, toute substance suffisamment fluorescente émettrait des rayons X chaque fois qu'une cause quelconque viendrait à l'illuminer.

Plusieurs savants se lancèrent sur cette piste.

L'un d'eux, M. Henri Becquerel, membre de l'Institut, était particulièrement qualifié pour partir en chasse sur un pareil terrain et quelque peu favorisé sans doute par les influences

1. *Revue générale des Sciences*, 30 janvier 1896.

ataviques : c'est en effet à son illustre père, M. Edmond Becquerel, que nous devons l'essentiel de nos connaissances en matière de phosphorescence et de fluorescence. Toujours est-il qu'il arriva bon premier, après une suite impressionnante de remarquables travaux, dans les recherches préliminaires qui servirent de préface à la découverte du radium.

En cet extraordinaire chapitre de l'histoire des sciences, rien n'est banal, pas même les débuts.

Parmi les substances signalées par M. Edmond Becquerel comme particulièrement aptes aux phénomènes de fluorescence figurent au premier rang les sels d'*uranium :* le verre d'urane est couramment employé aujourd'hui pour la fabrication de vases auxquels ces phénomènes valent précisément des effets de lumière particulièrement agréables.

Pour étudier le problème posé par M. Poincaré, il était donc inévitable que M. Becquerel fils s'adresserait à l'uranium de M. Becquerel père...

Or, admirez le prodigieux hasard :

Le point de départ de M. Becquerel est tout à fait erroné ; la fluorescence est totalement étrangère aux phénomènes surprenants que nous allons décrire ; ces phénomènes, cependant, une seule substance au monde est, à l'époque, capable de les produire, et cette substance, c'est... l'uranium !

Les acteurs présentés, voyons la scène.

Premier tableau : M. Becquerel enveloppe de papier noir une plaque photographique, place par dessus quelques cristaux de sulfate d'uranium, expose le tout au soleil, puis, après quelques heures, développe la plaque. Victoire ! l'image des cristaux apparaît sur la plaque[1] ; l'hypothèse paraît démontrée : la fluorescence provoquée dans l'uranium par la lumière solaire a développé des rayons X, puisque l'obstacle, le papier noir, a été franchi au-dessous des cristaux.

Deuxième tableau : les jours se suivent et ne se ressemblent pas. M. Becquerel veut répéter l'expérience, en interposant entre la plaque et les cristaux non plus seulement le papier

1. *Comptes Rendus*, 24 février 1896.

noir, mais une croix en cuivre de $0^{mm},1$, pour voir si en dignes sœurs des rayons X, les radiations de l'uranium transperceront cet obstacle plus sérieux.

Hélas !... Le soleil ne veut pas se montrer !... C'est excusable, vraiment, pour un soleil de février ; mais M. Becquerel s'impatiente, comme tout bon expérimentateur interrompu dans un essai qui le passionne. Il s'impatiente, sans se douter qu'il est encore, dans son épreuve, le favori de la fortune...

Le lendemain se passe, puis le surlendemain ; toujours la plaque attend au fond de son tiroir, sous ses lamelles cristallines, l'instant propice pour revoir le jour.

De guerre lasse, histoire de passer le temps, M. Becquerel la sort de son tiroir, la dégage de ses papiers, la développe : O surprise ! une impression intense apparaît sur la plaque [1].

Spontanéïté de l'émission uranique. — Ainsi, voilà encore une théorie par terre : on ne peut plus, après cela, parler de la fluorescence comme cause des rayons X. En revanche, voilà établi un autre fait, et combien plus mystérieux, combien plus passionnant : l'uranium, en dehors de toute illumination, de toute excitation extérieure, sans paraître subir dans sa constitution aucune modification, se montre capable de rayonner au dehors, infatigablement, de l'énergie !

C'est, pour certains esprits mal trempés, la hantise du mouvement perpétuel revue, corrigée et considérablement augmentée...

Pour affirmer, en un terrain si scabreux, point n'est exagéré d'être triplement prudent. M. Becquerel ne vient-il pas de s'en administrer la preuve en démolissant le lendemain l'affirmation de la veille ! Est-ce que l'uranium, au lieu d'être spontanément *actif*, n'aurait pas tout simplement, comme certains corps phosphorescents, la propriété d'emmagasiner les radiations lumineuses lorsqu'il est insolé et de ne les restituer — sous une autre forme — que très lentement?

Dans ce cas, évidemment, l'action devra aller s'affaiblissant.

---

1. *Comptes Rendus*, 2 mars 1896.

Or, des expériences répétées avec les mêmes cristaux maintenus dans l'obscurité montrent qu'après quelques semaines, après quelques mois, l'action n'a rien perdu de sa vigueur. Il y a neuf ans, à l'heure actuelle, que ces cristaux n'ont pas revu le jour : ils sont toujours aussi profondément actifs, émettent toujours les mêmes rayons, un peu moins pénétrants que les rayons Röntgen.

Le fait de la spontanéité de l'émission uranique, hardiment affirmé dès le premier jour par M. Becquerel, est donc aujourd'hui définitivement acquis; c'est bien à quelque chose de réellement nouveau que s'applique le nom, glorieux pour son parrain, de *rayons Becquerel.*

Caractères du rayonnement uranique. — Le rôle de la chance est terminé maintenant.

L'expérimentateur, lancé par elle sur une voie féconde, va déployer dans l'exploration de celle-ci des qualités remarquables.

M. Becquerel reconnaît d'abord que tous les composés de l'uranium, sans exception, possèdent ce caractère bizarre de la *radio-activité* — le mot est de Mme Curie; — que mieux encore ils le présentent à un degré d'autant plus accentué qu'est elle-même plus élevée leur teneur en uranium. Il en déduit que la propriété de la radio-activité appartient en propre à l'atome d'uranium, indépendamment des substances auxquelles il peut être combiné, que c'est, en d'autres termes, une propriété *atomique* de l'uranium.

Il a l'idée de voir si, par analogie avec les rayons X, les rayons uraniques déchargent les corps électrisés (voir p. 413). Fait extrêmement important, l'événement répond à son attente[1].

Un électroscope à feuilles d'or parfaitement isolé et chargé voit ses feuilles écartées se rapprocher progressivement dès qu'on place dans sa cage une parcelle d'uranium (*fig.* 223). En une heure et demie, la décharge est complète!

Du même coup, une méthode de mesure se trouve instituée

1. 7 mars 1896.

pour l'étude comparative de ces phénomènes, méthode d'une simplicité remarquable, basée sur la rapidité de la décharge de l'électroscope.

Enfin, un instant troublé par des résultats bizarres qu'il attribue ensuite à des *rayons secondaires* provenant des corps frappés par les rayons uraniques, M. Becquerel confirme le fait, annoncé par Rutherford, que ces rayons, en ceci encore semblables aux rayons de Röntgen (voir p. 417), ne sont susceptibles ni de se réfléchir, ni de se réfracter.

Tous ces faits, jusqu'ici, sont d'ordre microscopique. Seules, l'habileté de l'expérimentateur, la perfection et la délicatesse

Fig. 223. — Décharge de l'électroscope à feuilles d'or par un fragment d'uranium R.

des méthodes employées permettent de les mettre en valeur. Cela n'est pas, tant s'en faut, pour diminuer le mérite de leur révélation; mais beaucoup de savants, troublés dans leur quiétude, conservent par devers eux l'espoir d'une erreur d'interprétation.

Le doute, bientôt, ne sera plus possible; le terrain est maintenant préparé pour la grande découverte. Ce qui n'était qu'une lueur tremblante et incertaine va s'illuminer tout d'un coup de la clarté du jour...

Excusez cet accès de lyrisme, lecteur; une fois n'est pas coutume — et le sujet y prête!

Les travaux de Mme Curie. — La publication des travaux de M. Becquerel n'avait pas été, on le conçoit, sans exciter parmi le monde savant une louable émulation; les recherches d'autres physiciens, parmi lesquels on doit citer surtout Elster

Geitel et Schmidt en Allemagne, lord Kelvin en Angleterre, Rutherford au Canada, ne tardèrent pas à confirmer et à étendre les résultats annoncés par notre compatriote — sans y rien ajouter pourtant de bien sensationnel.

Tout le succès de la tâche, décidément, était réservé à notre pays.

Sur ces entrefaites, en effet, Mme Curie se mettait à l'œuvre dans un laboratoire illustré déjà par d'admirables travaux, celui de son mari, professeur à cette jeune École de Physique et Chimie, que son titre de municipale empêche de faire prendre au sérieux malgré tous les brillants services qu'elle a déjà rendus.

Les recherches de Mme Curie, initialement, avaient un but modeste. Elles devaient fournir une réponse précise à cette question bien légitime : la radio-activité est-elle réellement une propriété exclusive à l'uranium, ou, plus probablement, n'appartient-elle pas, à des degrés divers, à beaucoup d'autres corps ?

M. Becquerel, naturellement, s'était déjà interrogé à ce sujet, mais ses recherches n'avaient abouti à rien de concluant. Aussi, au début de ses travaux, Mme Curie ne songeait-elle guère à éclipser l'uranium : elle ne s'attendait à retrouver chez d'autres corps ses surprenantes propriétés qu'à un degré beaucoup plus effacé.

La méthode de mesure. — Premier succès : le thorium. — Or, pour remplir un pareil programme, il lui fallait instituer tout d'abord un système de mesures délicates et précises. Ce fut un grand bonheur pour la savante expérimentatrice — substantif d'un *genre* plutôt inaccoutumé en la matière — qu'un tel point de départ, car c'est sans aucun doute à la certitude de ses résultats initiaux qu'elle dut d'oser s'engager avec son mari dans le long et pénible chemin au bout duquel se trouvait le radium.

La méthode de Mme Curie est basée sur un perfectionnement facile à saisir de la méthode de décharge des corps électrisés.

Plaçons le corps à étudier, réduit en poudre fine, entre les

plateaux A et B (*fig.* 224) d'un condensateur à air intercalé dans le circuit d'une pile P et d'un galvanomètre très sensible G. Le corps à étudier, s'il est actif, rend l'air conducteur entre les deux plateaux. Un courant passe donc entre les armatures, est mesuré par le galvanomètre, et sa valeur fournit une mesure précise de l'activité de la substance. Tel est le principe de la méthode, à cela près que, pour des raisons de sensibilité et de précision, on utilise comme instrument de mesure le remarquable *quartz piézo-électrique* de M. Curie.

Entreprises avec le dessein modeste que l'on sait, les recherches de Mme Curie ne tardèrent pas à lui valoir une satisfaction de plus haute envergure. Parmi les innombrables substances inertes qui défilèrent entre les plateaux de son appa-

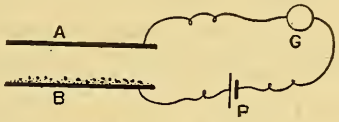


Fig. 224. — Mesure de la radio-activité.

reil et qu'elle énumère tout au long dans sa belle thèse de doctorat, un concurrent tout à fait sérieux de l'uranium se révéla un jour. C'était le *thorium*, autre métal rare, employé surtout jusqu'ici dans la confection des manchons Auer. Son activité, due à des rayons un peu plus pénétrants que ceux de l'uranium, est sensiblement égale à celle de ce dernier et apparaît aussi comme une propriété atomique du thorium, tous ses composés la présentant à un degré qui correspond à leur teneur.

Cette surprise agréable fut malheureusement suivie d'une de ces désillusions qui sont trop souvent le privilège du métier de chercheur : la découverte de Mme Curie arrivait quelques jours trop tard; publiée en avril 1898, elle suivait un mémoire de M. Schmidt paru dans les *Wiedemann Annalen* et dans lequel la propriété du thorium était précisément décrite!

Désagréablement surprise, Mme Curie ne se rebuta pas, et bien lui en prit : l'avenir ne devait pas tarder à lui offrir sa revanche.

L'anomalie de la pechblende. — Au nombre des substances étudiées par Mme Curie, les minéraux de l'uranium, cela va sans dire, figuraient en bonne place : comme on s'y attendait, ils furent sans exception trouvés radio-actifs. C'est ici qu'une singulière anomalie se présenta un jour[1], si singulière même que, moins certaine de la précision de ses mésures, l'expérimentatrice l'eût peut-être mise sur le compte d'une imperfection des appareils ou d'une erreur d'observation : certains de ces minerais, et en particulier un échantillon de pechblende (oxyde d'uranium impur) provenant de la mine de Johanngeorgenstadt, se montrèrent *quatre fois plus actifs* que l'uranium lui-même !

Ce fait était en flagrante contradiction avec la théorie de M. Becquerel : la propriété de l'uranium étant adéquate à l'atome même de ce métal, aucun composé de ce corps ne devrait être plus actif que l'uranium lui-même. Cependant, si la contradiction était formelle, les indications de l'appareil ne l'étaient pas moins; elles se répétèrent pour la pechblende de Johachimsthal, qui se montra trois fois plus active, et pour la chalcolite (phosphate de cuivre et d'urane), deux fois plus active. Chose encore plus probante, les résidus de pechblende, après extraction de l'uranium, conservèrent presque en totalité leur étonnante activité.

Sûre de son fait désormais, Mme Curie n'hésita pas à lui donner une interprétation. Si la pechblende était aussi active en dépit de l'inactivité relative de ses constituants, elle le devait sans doute à l'existence, sous forme de faibles traces, d'un corps *énormément actif*. Et, dans cette hypothèse, il ne devait pas être impossible d'arriver à isoler ce corps, dont l'intérêt scientifique serait sans doute incomparable. Devant une aussi passionnante éventualité, M. Curie se résolut à abandonner les importants travaux qu'il poursuivait alors, pour joindre ses efforts à ceux de sa femme.

Un problème difficile. — L'extraction du radium. — L'union des deux éminents physiciens n'était certes pas de

1. *Comptes Rendus*, juillet 1898.

trop pour venir à bout d'un si difficile problème. La tâche est déjà bien ardue d'extraire d'un minerai qui le renferme en proportion infinitésimale un corps connu, étudié, étiqueté sur toutes les coutures par les physisiens et les chimistes. Mais jamais jusque-là l'expression d'infinitésimale n'avait été aussi justifiée, puisque c'est à la dose de *un dix-millionième* environ que les pechblendes les plus riches contiennent les corps radio-actifs !

En outre, pour apprécier à sa valeur la tâche invraisemblable entreprise par M. et Mme Curie, ne perdons pas de vue qu'ils ne connaissaient *absolument rien* des propriétés du corps à trouver, sinon une manifestation plutôt hypothétique de son existence !

Entreprise avec les seuls moyens habituels de la chimie, la tentative était condamnée...

Heureusement, une ressource physique d'une sensibilité incomparable s'offrait d'elle-même aux deux expérimentateurs.

Si en effet la radio-activité est une propriété atomique du corps radio-actif cherché, sa valeur, mesurable d'une manière précise dans l'appareil de Mme Curie, doit être intimement liée à la proportion de ce corps présente dans la matière étudiée. Que, par suite d'une circonstance quelconque cette proportion vienne à varier, on en sera averti de suite par la variation du courant dans l'appareil en question. C'est une véritable méthode d'analyse, mais combien idéalement simple, sensible et rapide !

De là un moyen de définir successivement tous les caractères chimiques de notre substance sans en avoir jamais vu la moindre parcelle, sans rien connaître de ses parentés chimiques — ce qui est bien en quelque sorte le comble du paradoxe. De là la possibilité d'aller droit au but dans l'institution d'une méthode chimique de séparation.

En effet, un réactif quelconque essayé sur la complexe matière à traiter aura généralement pour effet de la séparer en deux fractions, l'une soluble, l'autre insoluble ; chacune de ces fractions pourra conserver de la radio-activité ou bien l'une d'elles, au contraire, pourra en être totalement privée à l'avan-

tage de l'autre : ce dernier fait, naturellement, prouvant que la totalité de la matière active s'est concentrée dans la seconde fraction, sera le plus précieux à utiliser dans l'établissement d'une méthode de séparation ; c'est ainsi que l'insolubilité du sulfate de radium a été révélée et qu'elle a été aussitôt utilisée pour débarrasser ce corps des nombreux éléments dont les sulfates sont au contraire solubles.

Mais des caractères spécifiques aussi nets ne se créent malheureusement pas sur commande. A défaut, force sera de se contenter du cas bien plus général d'un partage *inégal* des activités dans les deux fractions d'un traitement, et de le mettre à profit pour tendre patiemment vers un enrichissement progressif.

C'est ainsi qu'entre le radium et le baryum qui l'accompagne constamment, on ne connaît pas encore de différences spécifiques très tranchées, ces deux métaux étant chimiquement fort voisins : aussi, quand par une longue suite d'opérations, on est parvenu à n'avoir plus dans la matière traitée que du baryum avec un peu de radium, on ne peut plus tabler que sur la différence de solubilité des chlorures et, surtout, des bromures; les sels de radium étant les moins solubles. Le principe des cristallisations fractionnées, bien connu des chimistes, permet alors de tirer parti de cette différence de solubilité sans perdre par trop de matière active.

Sous le contrôle permanent de l' «activomètre » de Mme Curie, on passe donc petit à petit, au cours du traitement, à des activités plus grandes, en même temps que le poids de la matière traitée *s'effondre* avec rapidité par l'élimination progressive des portions inactives. Parti de *une tonne* de résidus de pechblende, on aboutit en fin de compte à 2 à 3 *décigrammes* d'un bromure cristallisé et pur !

Par contre, l'activité de ce produit est énorme : *deux millions de fois* plus grande que celle de l'uranium !

En fait, cette séparation pénible et coûteuse a valu à ses auteurs, malgré la collaboration de M. Bémont, chef des travaux pratiques à l'École de Physique et Chimie, beaucoup plus de peine encore que je n'ai pu le dire.

La pechblende, en effet, contient non pas seulement une substance active, mais *trois* au moins, douées chacune de caractères chimiques distincts. La séparation des matières actives d'après leurs activités mêmes ne se fait donc pas avec toute la netteté désirable, et l'établissement de la méthode de traitement s'en est trouvé considérablement compliqué.

Aujourd'hui, bien entendu, ces difficultés n'existent plus, des règles définitives ayant été établies ; le traitement des résidus de Joachimsthal, notablement amélioré par M. Debierne, ancien élève de l'École de Physique et Chimie, est une opération pratiquée couramment dans les usines de la *Société Centrale de Produits Chimiques*. Mais, indépendamment du prix de la matière première qui, résidu sans valeur autrefois, se dispute à prix d'or aujourd'hui, c'est toujours une opération extrêmement longue et coûteuse.

Il n'est donc pas surprenant que le radium détienne haut la main le record de la cherté et que le prix du *gramme* de ce produit ressorte encore à près de *deux cent mille francs !* Si prohibitif que cela paraisse, il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'un corps qui reste *indéfiniment tel*, qui peut servir indéfiniment aux expériences les plus variées *sans perdre rien de sa substance*. Sans compter que les budgets les plus formidables sont toujours ceux de la guerre et du « chambardement », et qu'on ne saurait payer trop cher le divin plaisir de bouleverser la science !...

Et la preuve que tout ceci n'est pas du paradoxe, la preuve que le prix du radium paraît fort raisonnable à ceux qui souhaitent s'en servir, c'est que la production est loin de suffire à la demande, bien qu'ayant déjà pu mettre en circulation, de par le monde, une dizaine de *grammes* du précieux produit !

La recherche de minerais nouveaux. — Pourtant, il ne faut rien exagérer. Il serait quelque peu outré de prétendre que grâce au prix énorme du nouvel élément, tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes. Nous verrons plus loin de quels immenses services la science est déjà redevable au radium. Cependant, si féconds qu'ils aient pu être, si rapides qu'ils se soient succédés, les travaux qu'il a provoqués eussent

encore à coup sûr gagné à n'être pas paralysés par l'extrême rareté de l'énigmatique métal.

Certes, il ne s'agit pas ici de regretter les progrès scientifiques acquis à très haut prix : quelques sommes qu'il faille les payer, les conquêtes de l'esprit humain sont inestimables, surtout quand elles atteignent une certaine envergure ; il n'en est pas moins vrai qu'accessible à un plus grand nombre, le mouvement scientifique dont nous sommes témoins en eût été plus imposant encore.

En outre, avec l'esprit utilitaire qui caractérise notre époque, on sait combien rapidement les applications pratiques succèdent toujours aux conquêtes théoriques. Il en serait certainement de même sur le terrain qui nous occupe, — car elles sont grandioses et multiples, les applications du radium que l'on peut concevoir ; — mais ici la considération terre à terre du coût probable et du bénéfice possible reprend tous ses droits, et, sauf sur quelques points, les espérances les plus légitimes sont restées lettre morte.

L'avenir est donc lié à la découverte de sources de radium nouvelles, de minerais riches et abondants. Heureusement, il n'est presque pas douteux que nous aurons sur ce chapitre des surprises agréables, parce que le nombre est très grand des personnes qui se passionnent à juste titre pour cette question et que beaucoup d'entre elles pourront coopérer à la recherche de ces minerais nouveaux.

Elle est en effet si facile, cette recherche, surtout en ce temps de photographie à outrance, qu'elle pourra inspirer peut-être à beaucoup de nos lecteurs le désir d'y consacrer quelques instants.

Il suffit de placer sur une plaque photographique de sensibilité courante, enveloppée de papier noir, les échantillons, sable ou roches, dans lesquels on veut reconnaître la présence du radium, et de laisser agir 24 heures, de préférence dans l'obscurité. Si à la révélation de la plaque une tache noire intense apparaît à la place qu'occupait un des fragments étudiés, on peut en inférer que cette substance contient vraisemblablement du radium — en proportion suffisante pour justifier son extraction.

Cette méthode si peu coûteuse a déjà conduit à quelques découvertes très utiles pour la science. Au cas où de bons résultats seraient obtenus par nos lecteurs, nous nous ferions un plaisir de les contrôler sur le reçu de la plaque impressionnée et d'un échantillon de quelques centaines de grammes de la substance active[1].

Le polonium, l'actinium, le radium. — Individualité chimique de ce dernier. — J'ai dit plus haut que le traitement de la pechblende avait fourni trois matières actives distinctes : la première obtenue[2] a été baptisée polonium, en souvenir du pays d'origine de Mme Curie ; très analogue au bismuth au point de vue chimique, le polonium est doué d'une activité très grande, un million de fois environ celle de l'uranium ; mais cette activité ne persiste pas avec sa valeur initiale et semble au contraire décliner rapidement. De plus, le polonium n'a pas été nettement caractérisé comme élément chimique distinct.

La seconde substance, l'*actinium*, a été découverte par M. Debierne[3] dans certaines portions du traitement de la pechblende; elle présente également une activité énorme, mais n'a pas encore été étudiée d'une manière assez complète, bien que l'on sache déjà qu'à certains égards elle se comporte de façon fort intéressante.

En outre, l'actinium non plus n'a pas été caractérisé comme individualité chimique distincte.

La troisième substance enfin, chimiquement semblable au baryum, est le *radium*[4], qui constitue un corps nouveau, doué d'un poids atomique bien déterminé et caractérisé par un spectre remarquable. C'est de lui que nous nous occupons surtout au cours de ces lignes.

La preuve de l'individualité chimique du radium a été fournie dès les premiers travaux de M. et Mme Curie. En effet, la belle assurance, la déduction logique, les raisonnements

---

1. G. Claude, Société *l'Air liquide*, 62, rue Saint-Lazare, Paris.
2. *Comptes Rendus*, juillet 1898.
3. *Comptes Rendus*, octobre 1899.
4. *Comptes Rendus*, décembre 1898 (M. et Mme Curie et M. G. Bémont).

impeccables des pages ci-dessus, rien ne nous est plus facile que de nous les payer... rétrospectivement. Dans la réalité, M. et Mme Curie étaient bien loin de nager dans des eaux si limpides. Alternativement en proie, dans leurs longues et fastidieuses opérations, au doute et à l'espoir, ils tenaient à s'entourer du plus de garanties possible dans l'avancement de leurs travaux.

Aussi avaient-ils demandé à l'éminent physicien Demarçay de suivre pour ainsi dire pas à pas l'étude spectroscopique des matières de plus en plus actives qu'ils obtenaient chaque jour.

Cette étude est basée, comme on sait, sur ce fait qu'un corps simple donné, chauffé jusqu'à l'incandescence, n'émet que certaines radiations de fréquence bien déterminée (voir p. 373) ; il fournit donc, lorsqu'on décompose par le prisme la lumière qu'il émet, un *spectre* composé uniquement de *raies lumineuses* de positions invariables et caractéristiques de l'élément considéré.

Ici encore, l'habituelle sensibilité des caractères spectroscopiques se montra à la hauteur de sa réputation. Avec des produits encore médiocrement actifs, M. Demarçay vit apparaître parmi les raies du baryum et d'autres corps connus, dans la région de l'ultra-violet (voir p. 374) une raie inconnue : l'existence d'un élément nouveau se révélait ainsi.

Mais était-ce bien du corps radio-actif qu'il s'agissait? La question ne resta pas longtemps douteuse, car parallèlement aux progrès de la radio-activité, on vit cette raie nouvelle augmenter, en même temps que deux autres raies très fortes apparaissaient, l'une bleue, l'autre violette. Enfin, quand on arriva aux produits très actifs de l'ultime traitement, le spectre, balayé petit à petit de toutes les raies étrangères, se réduisit aux trois raies en question, accompagnées en outre de quelques autres moins fortes, dont l'ensemble constitue le spectre du radium.

Mme Curie a de son côté déterminé le poids atomique de cet élément nouveau : elle l'a trouvé égal à 225.

Chose remarquable, ce poids atomique et ceux des autres corps radio-actifs, thorium 232, uranium 240, sont les plus élevés de toute la série des corps simples. Le bismuth, qui arrive après

eux, n'a comme poids atomique que 208, et encore, par ses affinités avec le polonium, confine-t-il peut-être aux corps radio-actifs ; le plomb, qui vient ensuite, a comme poids atomique 205, et on a signalé de divers côtés un corps radio-actif qui lui ressemble passablement[1]... Étrange coïncidence, qui acquerra un

Fig. 225. — Mme Curie.

puissant intérêt quand nous serons amenés, par des déductions d'un tout autre ordre, à considérer les atomes des corps radio-actifs comme des systèmes complexes en voie de simplification (p. 460).

1. Giesel, Hofmann et Strauss. Mais M. Debierne (*C. R.*, 25 juillet 1904) s'inscrit en faux contre cette affirmation et, d'après lui, le plomb radio-actif doit ses propriétés au polonium.

PROPRIÉTÉS DU RADIUM

Premières surprises : excitation de la fluorescence, actions chimiques. — Voici, sous forme de chlorure, le résultat du laborieux traitement d'une tonne de minerai radifère. Infiniment privilégiée, la montagne du bon La Fontaine accouchait d'une souris : De la montagne de pechblende de M. Curie sort à peine une pincée d'un sel blanc, cristallin, analogue à de vulgaire sel de cuisine, très pacifique d'aspect... Rien n'en transpire en apparence qui semble en rapport avec le gigantesque effort de ses patients auteurs...

Avec un peu d'attention pourtant, et bien que nous soyons en plein jour, nous constatons qu'une *gaine lumineuse* enveloppe la substance. Transportons-la dans l'obscurité : cette lueur y devient une véritable lumière, assez intense pour nous permettre la lecture d'un journal — à supposer que nous ayons du temps à perdre.

Ce n'est pas encore cela qui peut passer pour fort surprenant : un simple ver luisant en ferait presque autant — à condition pourtant de se nourrir et de renouveler ainsi l'énergie qu'il rayonne. Le piquant de l'histoire, c'est que le radium, lui, n'a pas besoin de s'alimenter. Et il n'en faut pas plus pour replacer devant nos yeux l'éternelle obsession du mouvement perpétuel...

Mais voici plus extraordinaire.

Approchons un écran au platinocyanure de baryum, identique à ceux dont on se sert en radiographie. Nous sommes encore à plus de 2 mètres de notre pincée de sel que l'*écran s'illumine!* Nous approchons de plus en plus, l'éclat devient très intense! Remplaçons l'écran par un autre recouvert de sulfure de zinc, par du diamant, par quantité d'autres substances : même résultat. Notre pincée de matière se comporte *comme une ampoule radiographique* de tout premier ordre!

L'analogie, au reste, se continue plus loin.

Vous cherchiez tout à l'heure une pièce obscure pour répéter ces expériences : j'aime à croire que votre choix n'est pas tombé sur le cabinet noir du photographe, car, vous vous en doutez,

sous leur triple enveloppe de carton noir et de papier, vous eussiez mis à mal toutes les plaques photographiques de l'endroit.

Comme les rayons X, en effet, et mieux qu'eux, les rayons du radium franchissent les obstacles les plus extravagants, papier, bois, verre, métaux, sans perdre au passage la faculté de provoquer des *actions chimiques puissantes :* réduction des sels d'argent, transformation du phosphore blanc en phosphore rouge, décomposition lente de l'eau, colorations bleues ou violettes fort curieuses des sels alcalins, du verre, de la porcelaine...

Applications à la radiographie. Actions électriques. — Si facile que soit le passage des rayons du radium à travers les obstacles, il y a cependant, comme pour les rayons X, des différences suivant la nature de ces obstacles. Les métaux et les os, par exemple, sont moins transparents que les chairs, de sorte que, sous certaines réserves formulées ci-après (p. 444), un simple grain de radium pourra peut-être suppléer auprès des radiographes tout l'appareil compliqué des tubes de Crookes et du matériel nécessaire à les alimenter.

Autre point commun entre les deux rayonnements : les corps électrisés se déchargent presque instantanément à travers l'air au voisinage du radium ; il est tout à fait inutile de tenter aux environs d'un fragment de ce corps — fût-il emprisonné dans *une boîte de plomb* — la plus petite expérience d'électricité à haut potentiel.

Et ce n'est pas seulement l'air qui est rendu perméable : les liquides diélectriques les plus parfaits, pétrole, térébentine, air liquide, les diélectriques solides eux-mêmes, ne sont pas épargnés. Supposez que, recherché partout avec avidité et doté sans doute d'applications importantes, le radium s'introduise un peu plus abondant dans nos laboratoires et dans nos demeures, et, sous l'avalanche des courts-circuits, nos électriciens ne sauraient bientôt plus à quel saint se vouer.

Actions physiologiques. Applications médicales. — Enfin, nous l'avons vu (p. 416) chevelure et peau des expérimentateurs des rayons X n'ont pas à se louer de la manière d'agir desdits rayons à leur égard.

Or, représentez-vous M. Becquerel, la poche lestée d'un petit tube de verre rempli de radium, partant donner à l'étranger une conférence impatiemment attendue. Arrivé au but, une petite cuisson sollicite son attention ; une légère rougeur apparait sur la peau à la place occupée par le tube de radium ; le lendemain, la tache est plus foncée ; huit jours plus tard, la peau tombe, puis la partie atteinte se met à suppurer, à se creuser : c'est à peine si deux mois de traitement suffisent à M. Becquerel pour se débarrasser de ce fâcheux bobo ! C'est charmant, on le voit, et sous ce rapport non plus, les rayons de Becquerel n'ont rien à envier à ceux de Röntgen.

De son côté, payé lui aussi pour se méfier, M. Curie a pu dire avec conviction qu'il se résignerait à tout, sauf à s'approcher par trop — par trop longtemps surtout — d'un morceau de radium de la grosseur du poing !

M. Curie n'exagérait rien : des souris, des cobayes meurent de convulsions tétaniques dix jours après une exposition de quelques heures à l'action de quelques centigrammes de radium (Danysz).

Ces prémices, à première vue, ne sont pas fort engageants pour tenter de faire un sort au radium au point de vue médical. Mais, on le sait, rien n'arrête les médecins en quête d'une *thérapie* nouvelle. Pas un agent qui échappe à leur vigilance et qui ne soit effectivement capable de bons résultats quand il est appliqué avec discernement : rayons rouges, violets, ultra-violets, cathodiques, air froid, air chaud, air liquide, il faut que tout y passe, il faut que notre pauvre machine humaine, stupéfaite parfois au point d'en guérir, se plie à toutes ces exigences.

Le radium n'a donc pas fait exception à la règle ; il semble réellement qu'avec lui, les médecins aient mis la main sur un moyen d'action puissant. Son action, comparable à celle des rayons cathodiques, mais plus profonde, paraît devoir donner de bons résultats dans les cas de lupus, de cancers superficiels et même profonds, dans certaines maladies d'yeux (Darier).

On lui a, toutefois, prêté des vertus analgésiantes qui, pour M. J. Rehns, seraient plutôt hypothétiques.

Ces tentatives doivent être conduites avec une grande pru-

dence, des accidents fort graves pouvant résulter d'une application trop prolongée ou de l'emploi d'un produit trop actif. Il faut se féliciter qu'en un sujet si délicat, des recherches scientifiques et précises soient entreprises au Collège de France sous la direction éclairée de M. d'Arsonval et de M. Bordas.

Déviabilité magnétique des rayons du radium. — Malgré toutes les surprises que nous vaut l'examen du radium, en somme, nous ne nous trouvons pas par trop dépaysés, puisque plus nous avançons, plus s'accuse la ressemblance entre le radium et l'ampoule radiographique.

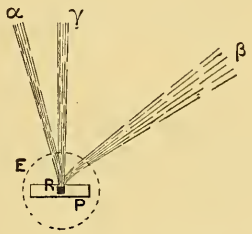


Fig. 226. — Déviations des rayons de radium dans un champ magnétique.

Mais cette ressemblance est-elle seulement superficielle, ou se continue-t-elle, au contraire, jusque dans la constitution intime des nouvelles radiations? Il est assez surprenant qu'il ait fallu arriver jusqu'à la fin de 1899 pour trouver à cette question une réponse satisfaisante. En manière de compensation, cette réponse a été fournie simultanément par trois physiciens[1], qui ont eu l'idée fort naturelle de reprendre avec le radium l'action du champ magnétique, si parfaitement féconde avec l'ampoule de Crookes (p. 402).

Pour opérer commodément, suivons les indications de Mme Curie. Le sel de radium est placé au fond d'une rainure profonde R, canal rectiligne minuscule pratiqué dans un bloc de plomb. Limité par les parois verticales de ce canal, un pinceau de rayons parallèles s'échappe de la fente sur toute sa

1. Giesel, *Wied. Annalen*, 2 novembre 1899; — Meyer et von Schweidler, *Acad. Anzeiger Wien*, 3 novembre 1899.

longueur. Le bloc est placé dans l'entrefer d'un électro-aimant puissant, non figuré ici, de telle façon que la traînée de radium soit disposée dans le sens des lignes de force du champ, que nous supposerons dirigées de l'avant vers l'arrière. Dans ces conditions, dès que le courant excitateur passera, l'action déviatrice pourra s'exercer s'il y a lieu, et on pourra la constater soit par le déplacement de la tache lumineuse provoquée sur un écran fluorescent, soit, plus à loisir, par l'impression d'une plaque photographique.

L'expérience est concluante.

Les rayons *sont déviés*, et fournissent ainsi la preuve définitive de leur parenté avec les rayons cathodiques, de l'existence de particules électrisées dans leur constitution (voir p. 416, 401).

Complexité du rayonnement. — Toutefois, l'expérience révèle ici une complication qui n'existait pas dans le cas des rayons cathodiques. Dans ce dernier cas, on se le rappelle, tout le faisceau était dévié d'*un bloc* (p. 401), démontrant par ce seul fait l'homogénéité de ses diverses parties.

Il n'en est pas de même ici.

Le faisceau émané du radium *s'épanouit* sous l'action magnétique, à la façon d'un pinceau de lumière blanche décomposé par le prisme. Il est donc composé d'*éléments différents*, puisque l'action magnétique agit sur eux de différentes façons.

En y regardant de près, on trouve à cette dispersion des caractères remarquables. Tandis qu'une partie du faisceau est déviée en *éventail* vers la droite et qu'une faible portion n'est pas déviée du tout, une fraction très importante est légèrement rejetée vers la gauche, sensiblement *en bloc* cette fois (*fig.* 226).

La première fraction se comporte, au point de vue du sens de sa déviation, comme les rayons cathodiques. On est ainsi amené à la considérer comme constituée par des particules électrisées *négativement*, mais différentes les unes des autres — puisque leur déviation diffère — soit par leur vitesse, soit par leur charge électrique ou leur masse.

M. et Mme Curie ont réussi à confirmer directement cette manière de voir en faisant agir ces rayons sur un électromètre isolé, qui se charge négativement si l'on s'arrange pour qu'il ne se décharge pas à mesure de l'apport, sous l'influence de la conductibilité inévitable acquise par l'air en ces circonstances (p. 435).

Les rayons déviés vers la gauche, en sens inverse des rayons cathodiques, se révèlent par ce fait comme constitués par des particules électrisées *positivement*. Ils paraissent à cet égard identiques aux rayons canaux (kanalstralhen) des ampoules cathodiques (p. 399). *Également déviés* par le champ magnétique, les corpuscules qui constituent ces rayons paraissent tous identiques ; *faiblement déviés*, ils nous donnent à entendre ou que leur vitesse est très grande, ou qu'ils sont très lourds par rapport à la charge électrique remorquée. Nous verrons dans un instant à décider entre les deux hypothèses.

Quant à la troisième fraction, celle qui n'est pas déviée, son impassibilité même conduit à l'assimiler aux rayons de Röntgen (voir p. 413), dont elle partage au reste toutes les propriétés.

On a donné des noms à ces trois catégories de rayons. Préoccupation louable, car il ne s'agit pas ici de faire étalage d'érudition, mais de simplifier le langage. On dénomme rayons α (alpha) d'après Rutherford, les rayons électrisés positivement, rayons β (bêta) ceux électrisés négativement, rayons γ (gamma), enfin, ceux qui ne sont pas déviés.

Voici donc déjà, grâce à cette seule action du champ magnétique, quelques éclaircissements. Mais nous savons combien, dans l'étude des rayons cathodiques, nos idées se sont précisées lorsqu'à cette action nous avons pu superposer l'action des corps électrisés, des champs électriques (voir p. 402).

Déviabilité électrique des rayons du radium. — Or, les expériences de Dorn[1] et de Becquerel[2] ont prouvé que cette précieuse ressource est ici encore à notre disposition : les rayons du radium, eux aussi, sont déviés dans un champ électrique

1. *Abh. Halle*, mars 1900.
2. *Comptes Rendus*, t. CXXX.

intense — sauf, bien entendu, les rayons γ, qui confirment par cette indifférence l'absence de corpuscules chargés dans leur constitution.

Je ne recommencerai pas ici des raisonnements qui, exactement calqués sur ceux établis dans le cas des rayons cathodiques (p. 400), nous montreraient de même que la simple comparaison des déviations électrique et magnétique permet de calculer : 1° la vitesse des corpuscules des groupes α et β ; 2° le rapport de la charge électrique à la masse pour chacun de ces corpuscules.

Je dirai en outre que M. J.-J. Thomson a pu reprendre dans le cas du radium ses curieuses expériences de dénombrement des gouttelettes d'eau du brouillard que le radium provoque dans l'air humide aussi bien que les rayons cathodiques (voir p. 406). Comme alors, cela lui a permis de calculer, d'après la charge électrique totale transportée par toutes les gouttelettes, la charge individuelle de chacune d'elles, c'est-à-dire du corpuscule qui lui a donné naissance.

Telles sont, toujours aussi simples, toutes ces mesures que vous vous figureriez à tort terriblement difficultueuses.

Ces quelques renseignements fournis sur les méthodes de mesure, mes lecteurs, je l'espère, pourront absorber les résultats suivants sans arrière-pensée sur leur réalité.

Vitesse, charges et masses des corpuscules du radium. — Les particules qui constituent les rayons négatifs ou rayons β sont lancées avec une vitesse que les différentes valeurs de la déviation révèlent comme variable d'une particule à l'autre, mais qui est *beaucoup plus grande* que celle des rayons cathodiques. De 60.000 kilomètres par seconde pour les particules les plus lentes, elle s'élève, d'après Kaufmann, à 283.000 pour les plus rapides, soit aux *quatre-vingt-quinze centièmes* de la vitesse de la lumière !

Les particules positives constituant les rayons α vont beaucoup moins vite — ce qui leur permet encore l'allure plus que respectable de 20.000 kilomètres par seconde. Nous nous demandions il y a un instant si leur faible déviabilité n'était pas due à leur extrême vitesse : on voit que non.

Mais, alors que le rapport de la charge à la masse des corpuscules β, sensiblement le même que pour les rayons cathodiques (p. 405), est très grand, soit de l'ordre de 1.000 fois celui des atomes d'hydrogène transportés par l'électrolyse, ce rapport est à peine comparable à celui de ces atomes pour les corpuscules α. L'électrisation de ceux-ci étant donc, à masse égale, considérablement plus faible, il n'est pas étonnant que malgré la vitesse plus faible, la déviation soit moindre.

D'autre part, M. J. Thomson, opérant comme nous l'avons dit, a constaté que la charge électrique accompagnant chaque corpuscule, positif ou négatif, est *invariable*, toujours égale à celle transportée par un atome d'hydrogène pendant l'électrolyse. Cette permanence de la charge électrique dans des circonstances si diverses, qu'il s'agisse d'électrolyse, de rayons cathodiques ou de rayons du radium, est décidément bien suggestive : elle paraît définitivement établir la notion de l'atome insécable d'électricité, de *l'électron* (voir p. 407, 134).

Par contre, le rapport de la charge à la masse étant 1.000 fois plus grand chez les corpuscules β que dans les atomes électrolytiques d'hydrogène, il faut — puisque la charge est la même — que la masse de ces corpuscules soit 1.000 fois inférieure à celle des plus petits de nos atomes : ces corpuscules, en d'autres termes, paraissent identiques à ceux dont la petitesse nous a stupéfiés jadis (voir p. 407) et que projette, quelle que soit sa nature, la cathode de l'ampoule de Crookes. Ils s'imposent de plus en plus à nous comme constituants généraux de tous les corps.

Au contraire, les particules positives α, qui, avec une charge identique, ont un rapport de charge à masse voisin de celui des ions d'hydrogène, semblent d'après cela fort comparables aux atomes d'hydrogène ou d'hélium de nos physiciens, tout heureux de sauver du naufrage cette dernière bribe de leurs anciennes croyances.

Cette projection d'atomes aussi légers que ceux de l'hydrogène ou de l'hélium par un corps à atomes aussi lourds que le radium (voir p. 432) est bien faite elle aussi pour mériter quelques méditations.

Quant aux rayons γ, comme les rayons de Röntgen, ils

doivent vraisemblablement leur origine aux chocs des projectiles α ou β avec la matière avoisinante.

Spinthariscope de Crookes. — Dans les déductions successives qui nous ont amenés jusqu'ici, nous avons fait tous nos efforts pour procéder avec prudence. Il se peut cependant que vous ne soyez pas parfaitement convaincu de la légitimité de raisonnements qui nous conduisent à de si surprenantes conclusions, auquel cas les vérifications expérimentales que nous pourrons faire seront certainement les bienvenues.

Et d'abord, lorsque je vous demande de considérer le radium comme tirant dans l'espace un perpétuel feu d'artifice,

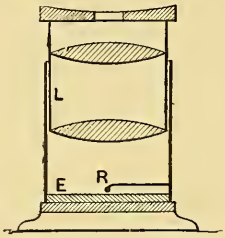


Fig 227. — Spinthariscope de Crookes. R, fragment de radium.

vous aimeriez assurément qu'on réussisse à vous faire voir, de vos yeux, ledit feu d'artifice. Sir W. Crookes, l'illustre physicien anglais à qui revient la paternité de cette surprenante conception du bombardement moléculaire, se devait de déférer à ce désir pour vous convaincre définitivement de l'excellence de sa doctrine. Il y a brillamment réussi à l'aide d'un petit appareil très simple au nom fort prétentieux, le *spinthariscope*.

Examinons à la loupe un écran de platinocyanure de baryum placé au voisinage immédiat d'une parcelle de radium (*fig.* 227). Un spectacle assez inattendu s'offre à nos regards. La plaque apparaît comme constellée par une multitude de points lumineux, qui s'allument incessamment pour disparaître aussitôt. C'est le feu d'artifice en question. Chacun de ces points aussitôt éteints révèle le choc d'un de nos projectiles, des plus gros sans doute, ceux du genre α, car l'interposition entre le radium

et l'écran d'une lame de verre très mince (voir ci-dessous), suffit pour arrêter le phénomène.

Impressionnante vision, pour la première fois depuis les origines de la chimie, nous serions donc en présence d'une manifestation individuelle de l'atome, de cet atome, base primordiale et jusqu'à ce jour insaisissable des conceptions de nos savants. L'atome nous apparaitrait ainsi au moment précis où sa simplicité est mise en doute et où, à la lumière de nouvelles conceptions, nous commençons à reconnaître en lui un monde tout entier...

Propriétés des diverses espèces de rayons. — Connaissant la nature et la vitesse des diverses espèces de rayons fournies par le radium, nous pouvons maintenant nous payer le plaisir de prévoir à l'avance la plupart de leurs propriétés. Si l'événement confirme nos prévisions, nous y trouverons autant de vérifications nouvelles de l'exactitude de nos conceptions.

L'un des caractères les plus étranges de ces radiations est celui en vertu duquel il n'est pas pour elles d'obstacle absolu. Or il est certain que plus la ténuité et plus la vitesse des particules seront grandes, et plus sera grand aussi, d'après ce que nous avons expliqué (p. 409), leur pouvoir de pénétration à travers les interstices des systèmes atomiques (p. 464). Par conséquent, relativement énormes et comparativement lents, les projectiles α devront être de beaucoup les moins pénétrants : on constate effectivement qu'une lame d'aluminium de $0^{mm},01$ est suffisante pour amortir leur fougue et pour les absorber entièrement.

En recouvrant en effet d'une semblable lame la rigole de radium de la figure 226, on supprime entièrement toutes les radiations situées vers la gauche — et elles seules.

Cette absorption des rayons α est même si facile que l'air seul suffit à la réaliser et qu'à 7 centimètres du fragment de radium étudié, tous les phénomènes attribuables aux rayons α disparaissent.

En raison de leur ténuité incomparablement plus grande, les rayons β doivent être bien plus pénétrants. L'expérience prouve

qu'ils le sont même beaucoup plus que les rayons cathodiques, et cela n'a rien d'étonnant, puisqu'ils sont constitués par les mêmes particules, mais se mouvant avec une vitesse 4 à 5 fois plus grande. Aussi, alors que les rayons cathodiques peuvent à grand'peine traverser des lames d'aluminium de $0^{mm},01$ (voir p. 408) et s'éteignent après quelques centimètres de parcours dans l'air, les rayons β les plus rapides sont capables de traverser presque sans diffusion des lames d'aluminium 10 fois

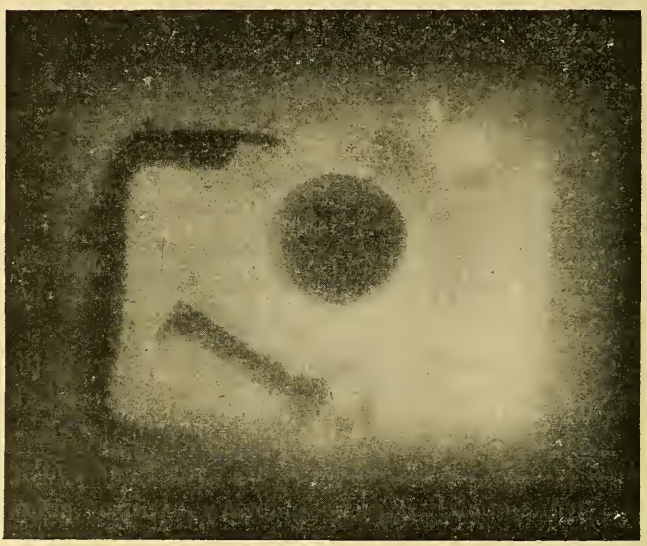


Fig. 228. — Radiographie fournie directement par un sel de radium.

plus épaisses, et peuvent être décelées dans l'air à 2 mètres et plus de leur point d'émission.

Toutefois, les rayons β les moins rapides sont *fortement diffusés* par un semblable écran.

Imperfection des radiographies au radium. — Ces phénomènes de diffusion lors du passage des rayons β à travers les obstacles augmentent naturellement avec l'épaisseur de ceux-ci; c'est pourquoi une radiographie exécutée avec la totalité du rayonnement du radium fournit invariablement des épreuves dont la figure 228 est un exemple et dont la netteté ne rappelle que pour la faire regretter la perfection des pro-

ductions du tube de Crookes (voir *fig.* 221). On ne peut retrouver un peu de celle-ci qu'à la condition d'enlever totalement par l'action électrique ou magnétique les rayons α et β : on ne laisse plus agir ainsi que les rayons γ, qui sont comme nous savons des rayons Röntgen ordinaires, mais mieux préparés à leur rôle d'ondes solitaires (p. 417) par l'instantanéité des chocs dus à l'extrême rapidité des projectiles β — et qui, comme tels, sont doués d'un énorme pouvoir de pénétration.

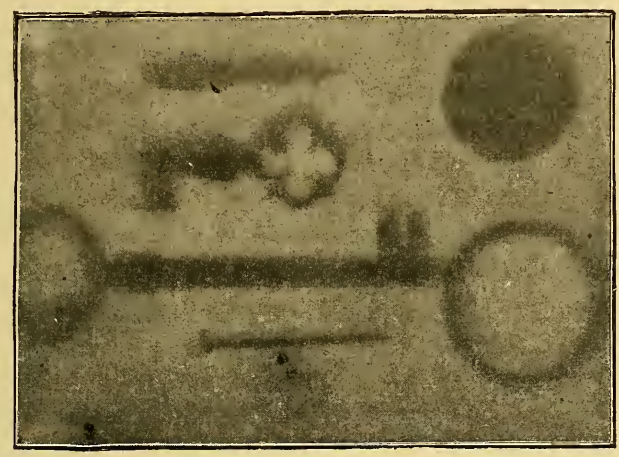


Fig. 229. — Radiographie obtenue par M. Boulay avec un mélange de chlorure de radium et de sulfure de zinc d'activité 1000, placé dans la plaque. Temps de pose, 2 heures.

Mais on tombe alors dans un autre inconvénient : la proportion des rayons γ dans le rayonnement total du radium est très faible[1].

Il faut alors prolonger outre mesure la durée de la pose, d'autant plus que leur surprenant pouvoir de pénétration empêche les rayons γ de développer toute leur énergie sur la plaque, dix plaques superposées pouvant à peine l'arrêter. On est alors infiniment loin de la quasi instantanéité que réclame

1. Des mesures auxquelles il ne faut évidemment attacher qu'une signification relative ont montré à Mme Curie qu'au point de vue des courants fournis dans son appareil la proportion des rayons α étant de 60 0/0 environ et celle des rayons β de 30 0/0, celle des rayons γ ne dépasserait guère 10 0/0.

impérieusement la radiographie en matière de chirurgie ou de médecine.

Toutefois, M. Boulay a pu obtenir des radiographies un peu plus nettes en un temps notablement plus court, en employant des tubes contenant un sel de radium mélangé à du sulfure de zinc phosphorescent : celui-ci arrête en partie les radiations nuisibles et y substitue des rayons de Röntgen. Il n'est pas impossible qu'à persévérer dans cette voie on n'améliore beaucoup encore les effets obtenus.

Électrisation spontanée des sels de radium. — Abandonnons à eux-mêmes, après les avoir placés dans un tube de verre mince scellé, quelques décigrammes d'un sel de radium. Que va-t-il se passer ?

Avec toute autre chose il ne se passerait rien ; mais nous ne pouvons nous attendre à voir un corps comme le radium se résigner à pareille tranquillité.

Effectivement, il va continuer à lancer autour de lui son feu d'artifice de projectiles. De ceux-ci, les rayons β et γ s'échapperont comme nous savons en traversant le verre (p. 444) ; mais les projectiles α viendront s'y aplatir. Or, les rayons β emportant continuellement des charges négatives et l'énergie des charges positives α ne sortant au dehors qu'en faible proportion sous forme de rayons Röntgen, l'intérieur du tube doit s'électriser positivement à un potentiel progressivement croissant !

On comprend dès lors le curieux accident arrivé à M. Curie quelque temps après sa découverte.

Ayant voulu retirer après quelques mois le radium contenu dans un tube de verre scellé, il fit avec une lime un léger trait dans le verre : à ce moment une étincelle jaillit et M. Curie ressentit dans les doigts la classique secousse de la bouteille de Leyde. Chose plus grave, une petite explosion se produisit, qui eut comme déplorable effet de projeter de tous côtés une partie de la précieuse matière. A 200 francs le milligramme, c'était là de joli travail ! Et M. Curie, aidé de son préparateur, n'eut pas de trop d'une dizaine de jours et de quelques paires de lunettes pour retrouver à terre les fragments dispersés.

L'étincelle, nous en avions avant la lettre, trouvé l'explication ; quant à l'explosion, il faut l'attribuer au fait que le sel de radium était humide, que l'eau s'était lentement décomposée (p. 435), d'où surpression considérable par l'accumulation des gaz dégagés.

Le radium offre donc l'exemple, jusqu'à présent unique, d'un corps *qui se charge spontanément* d'électricité.

Dégagement spontané de chaleur des sels de radium. — Lorsque les projectiles α choquent la paroi du tube qui les renferme, l'anéantissement subit de leur vitesse (20.000.000 de mètres par seconde) doit provoquer un dégagement de chaleur fantastique : rappelez-vous la balle de fusil que ses 500 misérables mètres par seconde suffisent à faire fondre quand elle s'aplatit sur la cible, et songez que le développement de chaleur s'accroît comme le *carré* de la vitesse !

Effectivement, malgré l'extrême petitesse de ces corpuscules — nous ne les considérons comme très gros que par rapport à des particules infiniment plus petites que tout ce que nous pouvons imaginer — le dégagement de chaleur qu'ils provoquent est suffisant pour maintenir toute la masse, d'une manière indéfinie, plus chaude de 1°,5 que l'espace ambiant[1] Cet échauffement sera plus grand si nous mettons obstacle à la dissipation de la chaleur par rayonnement : par exemple, en plaçant la matière active dans un de ces récipients Dewar d'Arsonval dont l'isolement calorifique est si remarquable qu'on peut y conserver pendant de longs jours l'air liquide lui-même, l'excès de température peut atteindre 3°.

Si l'isolement calorifique était parfait, rien n'empêcherait sans doute la température de s'élever au-delà de toute limite, car, et c'est une chose étrange de plus, ce dégagement de chaleur est tout à fait indépendant de la température : au rouge il se maintient imperturbable, et il se continue avec la même intensité[2] à la température la plus basse que nous connaissions, celle de l'hydrogène liquide (— 250°).

1. Curie et Laborde, *Comptes Rendus*, 16 mars 1903.
2. Curie et Dewar, *Société Royale de Londres*, 18 juin 1903.

Nous n'avons jusqu'ici dans ce phénomène si curieux que l'indication, mais non la *mesure* précise d'un dégagement de chaleur. Une telle mesure serait cependant d'intérêt capital, car, retombant alors de nos mystérieuses radiations dans une forme connue de l'énergie, nous pourrions enfin, grâce à elle, chiffrer en unités connues une fraction au moins de la puissance nécessitée par ces surprenantes manifestations.

Cette mesure est d'ailleurs excessivement facile.

Il suffit de dépenser la chaleur dégagée dans un effet coûtant une quantité de chaleur connue : nous pouvons l'employer, par exemple, à faire fondre de la glace, ce qui exige 80 calories par kilogramme d'eau formé.

Le résultat est fait pour confondre l'imagination.

Le chlorure de radium pur fond, par heure, plus que son poids de glace ! Il dégage, par kilogramme, 100 calories par heure, 870.000 par an : c'est la quantité de chaleur fournie par la combustion de 110 kilogrammes de charbon ! En énergie mécanique, ces 870.000 calories représenteraient une puissance de *quatorze cents chevaux* maintenue une heure durant. Encore ne tenons-nous compte que de l'énergie restée prisonnière, alors que les radiations β et γ en emportent leur part.

Et le plus surprenant, dans cette invraisemblable histoire, c'est que malgré une aussi énorme déperdition, les observations les plus minutieuses sont absolument incapables de révéler après plusieurs années la moindre modification dans l'état du radium !

Ainsi, bien plus extraordinaire que le tonneau des Danaïdes, qui n'était, à tout prendre, qu'un tonneau hors d'usage, le radium se comporte comme un vase toujours plein, quelque bonne volonté qu'on mette à le vider.

D'ailleurs, à supposer que le radium soit en état de se transformer entièrement au cours de son existence en particules douées seulement d'une vitesse de 20.000 kilomètres par seconde[1], on peut voir que chaque kilogramme de radium

1. C'est-à-dire en ne considérant que les particules α, qui sont effectivement *à nombre égal* (hypothèse de Crookes, p. 408), les plus importantes au point de vue de la force vive, par suite de l'énormité relative de leur masse.

mettrait en liberté $\frac{1}{2} mv^2$, soit

$$\frac{1}{2 \times 9.81} \times \overline{20.000.000}^2 \doteq 20 \text{ trillions de kilogrammètres,}$$

ou

$$\frac{20.000.000.000.000}{270.000} = 75 \text{ millions de chevaux-heures environ ;}$$

A raison de 1.400 chevaux-heures chaque année, il pourrait donc rayonner sans discontinuer pendant

$$\frac{75.000.000}{1.400} = \textit{cinquante mille années} \text{ environ}$$

et ne perdrait, au cours de cette étonnante carrière, que le *millième* de son poids tous les cinquante ans !

Cette diminution est donc bien peu rapide, et on conçoit qu'avec nos moyens d'observation imparfaits — troublés d'ailleurs par les mille phénomènes accessoires, physiques, chimiques, électriques, que le radium provoque de si copieuse façon — nous ayons pu craindre un instant que le poids du radium reste invariable, ce qui aurait marqué, pour quelques-uns de nos principes, le signal d'une retraite plutôt précipitée.

LA RADIO-ACTIVITÉ INDUITE

Propagation de la radio-activité. — Émanation du radium. — Limité aux manifestations ci-dessus, le bagage du radium serait, on peut le dire, déjà plus qu'honorable. Nous ne sommes cependant pas au terme de nos surprises, et les phénomènes de radio-activité induite, découverts par M. et Mme Curie[1], vont ouvrir de nouveaux horizons à notre stupéfaction.

1. *Comptes Rendus*, 6 novembre 1899.

Quand on expérimente avec du radium maintenu *à l'air libre*, on ne tarde pas à constater que, fort libéral, il ne conserve pas pour lui seul le bénéfice des forces mystérieuses dont il est détenteur : au bout de peu de temps, les corps placés à son voisinage acquièrent pour quelques heures — avec une intensité qui peut dépasser 10.000 fois celle de l'uranium — des propriétés identiques : faculté de décharger les corps électrisés, d'illuminer les écrans fluorescents, etc. Rien n'échappe à cette curieuse action ; métaux, bois, verre, papier, opérateurs eux-mêmes, se changent en produits radifères d'excellente qualité !

A première vue, on pourrait estimer qu'il s'agit là d'un nouvel effet du rayonnement précédemment étudié, d'un effet de même ordre que celui qui illumine les écrans fluorescents. Il n'en est pas ainsi cependant : alors que la fluorescence des écrans se produit parfaitement bien, même si le radium est enfermé en tubes scellés, l'*activation* des matières avoisinantes exige, pour se produire, que le radium soit placé *à l'air libre*, ou tout au moins *dans la même enceinte* que les substances à *activer*.

Le phénomène a donc une autre source. Tout au moins est-il indépendant des rayons β et γ, qui traversent le verre, et ne peut-il dépendre, au plus, que des rayons α.

Pour aller plus loin dans nos conjectures, il est utile de préciser les conditions du phénomène.

La plus essentielle de ces conditions vient d'être définie : pour que l'activation des corps solides ou liquides se produise, il faut que ces corps soient en relation avec le radium par l'intermédiaire *d'une atmosphère quelconque*. Cette masse gazeuse, qui devient elle-même fortement radio-active, semble être le véhicule nécessaire à la transmission. Envoie-t-on sur le radium un courant d'air, celui-ci — sans diminuer en rien les effets de fluorescence ou les effets chimiques du rayonnement — emporte au loin tout ce que le radium peut céder de radio-activité et n'en laisse rien aux corps avoisinants. Il semble, comme le premier l'a remarqué Rutherford[1], que la

1. Rutherford, *Philosoph. Mag.*, février 1900 (hypothèse faite d'abord à propos du thorium).

masse gazeuse recueille, pour la déposer ensuite sur tous les corps qu'elle touche, une *émanation* très-subtile, analogue à un gaz ou à une odeur, que le radium dégagerait d'une manière permanente et qui conserverait quelques-unes de ses propriétés!

Chose curieuse, cette émanation se propage dans la masse gazeuse tout entière, même si celle-ci ne communique avec le radium que par des tubes capillaires. Faisons à ce propos la belle expérience ci-après.

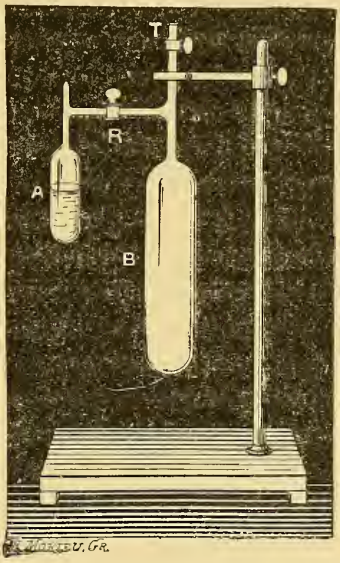


Fig. 230. — Propagation de l'émanation par des tubes capillaires.

Une ampoule de verre A est à demi pleine d'une *solution* d'un sel de radium, dont l'émanation, pour des raisons exposées ci-après, semble se dégager beaucoup plus facilement et régulièrement que d'un sel solide; elle communique par un tube capillaire *t* à robinet R avec un réservoir de verre B enduit de sulfure de zinc. Tant que R est fermé, l'émanation s'accumule en A. Dès qu'on ouvre R, l'émanation diffuse dans B et le sulfure s'illumine à tel point qu'à 20 centimètres il est possible de lire! La loi qui préside à cet écoulement de l'émanation par un tube capillaire a été déterminée[1] : elle est identique à celle qui

1. Curie et Danne, *Comptes Rendus*, 9 février 1903

régit la diffusion des gaz et comparable à celle de l'acide carbonique.

D'ailleurs, on a pu constater aussi que l'émanation suit la loi de Mariotte.

Ce sont là des preuves convaincantes à l'appui de la conception de Rutherford.

Condensation de l'émanation. Hypothèse sur sa provenance. — Ce remarquable physicien s'est d'ailleurs chargé d'apporter une confirmation plus saisissante encore de la réalité de son hypothèse en démontrant que, comme un gaz, l'émanation est susceptible de se *condenser* quand on abaisse sa température au-dessous d'une certaine limite — et que, comme un gaz, elle revient à l'état primitif lorsqu'on relève la température.

Cette température de condensation de l'émanation est de — 150° environ, facile à atteindre et à dépasser à l'aide de l'air liquide, dont la température est comme on sait de — 190°. Voici la forme très brillante que M. Curie a donné à la belle expérience de Rutherford.

Trois ampoules A, B, C, communiquent entre elles par des tubes *t*, *t'* à robinets R, R'. A contient une solution de radium et non un sel solide pour la raison donnée ci-dessus ; R et R' étant fermés, on a laissé l'émanation s'accumuler dans A pendant un jour ou deux. B et C sont enduits de sulfure de zinc. Initialement, A seul est faiblement lumineux dans l'obscurité; mais si on ouvre R, l'émanation se répand dans B et illumine vivement le sulfure de zinc; si on ouvre R', C s'illumine à son tour en même temps que l'éclat de B diminue par suite du partage avec C de l'émanation.

Enfin, vient-on à plonger C dans un récipient plein d'air liquide, sa luminosité augmente et devient remarquable, tandis que celle de B disparaît : toute l'émanation s'est condensée dans C. On peut alors fermer R' et sortir l'appareil de l'air liquide : le réservoir C reste seul lumineux.

Si C est très petit par rapport à A et à B, on peut ainsi condenser dans un espace fort restreint des quantités considérables d'émanation.

Il faut, bien entendu, n'attacher à cette expression de grandes quantités d'émanation qu'un sens fort relatif : en fait, on n'a jamais réussi à constater la moindre augmentation de poids d'ampoules faisant montre, grâce à l'émanation condensée, d'une activité considérable. L'émanation n'existe jamais qu'à l'état de traces incomparablement faibles, et c'est pour cela que les physiciens sont si en peine de définir ses propriétés et l'ont dotée d'un nom si moyenageux.

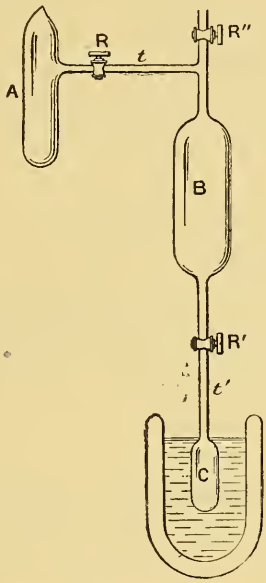


Fig. 231. — Condensation de l'émanation dans l'air liquide.

Cependant, examiné au spectroscope, un tube chargé d'émanations comme nous venons de le dire fait apparaître trois raies nouvelles, trois raies inconnues, tout à fait différentes de celles du radium, et qui constituent le spectre de l'émanation.

D'où provient l'émanation ? Nous avons vu tout à l'heure (p. 450) que les rayons β et γ devaient être étrangers à sa production puisqu'au contraire de ces rayons, celle-ci ne diffuse pas au dehors d'un tube scellé.

Constituerait-elle une manifestation tout à fait indépendante de tout ce que nous avons rencontré jusqu'ici ? On

a paru l'admettre assez volontiers. On peut pourtant faire au moins une hypothèse très simple pour rattacher au bombardement moléculaire le dégagement de l'émanation.

En effet, les rayons α se sont révélés dans nos précédentes recherches (p. 441) comme constitués par des particules matérielles tout à fait identiques aux atomes d'hydrogène ou d'hélium, donc vraisemblablement de nature gazeuse. D'autre part, nous savons que ces rayons sont toujours arrêtés dans leur course soit par la paroi de l'enceinte, soit simplement par son atmosphère. Ainsi, les atomes qui constituent les centres matériels des rayons α restent forcément prisonniers dans l'enceinte, plus ou moins modifiés, plus ou moins différents de la matière ordinaire par le fait de leur électrisation antérieure.

Quoi de plus naturel d'admettre que ce sont ces atomes qui constituent l'émanation ?

Cette explication simple pourtant, paraît incomplète, car, si l'on s'en rapporte à la vitesse de diffusion de l'émanation (v. p. 452), il semble exister dans celle-ci, indépendamment des particules α, des atomes très lourds, dont le poids atomique ne serait pas inférieur à 50.

Instabilité de l'émanation. — Quoi qu'il en soit, d'après les essais précédents, la radio-activité qu'une masse gazeuse acquiert au contact du radium se conserve lorsque cette masse est transportée dans une autre enceinte. Il est donc loisible de l'amener, pour l'étudier, dans l'appareil de Mme Curie, un peu modifié pour la circonstance.

Grâce à ce fait, une particularité capitale de l'existence de l'émanation va pouvoir être mise en évidence.

La première constatation à laquelle donne lieu cette étude, c'est que l'activation de la masse gazeuse progresse avec la durée de son séjour au contact du radium, mais non pas indéfiniment : elle tend *vers une certaine limite*, atteinte après un jour ou deux, et cette limite est d'autant plus élevée qu'est plus considérable la quantité de radium présente dans l'enceinte.

On constate aussi que, toutes autres choses égales d'ailleurs, cette limite est parfaitement indépendante de la nature du

gaz et de sa pression. Le vide lui-même s'active aussi fortement que l'air, ce qui est naturel si, comme le pense Rutherford, l'émanation est une sorte de matière qui se répand dans l'espace ambiant.

De plus, séparée du radium, la masse gazeuse, même enfermée dans un tube scellé, *se désactive progressivement;* la radio-activité qu'elle a acquise n'est pas perpétuelle comme celle du radium : en vérité, ce serait trop commode ! Le rayonnement Becquerel assez intense qui s'en échappe diminue suivant une loi qui a été déterminée par M. Curie[1] et qui est tout à fait remarquable par sa constance : quelle que soit la nature de l'enceinte, quelles que soient la nature du gaz, sa pression, sa température, l'activité tombe invariablement, après *quatre jours*, de la moitié de sa valeur.

Si donc l'émanation présente à beaucoup d'égards les caractères d'un gaz, la constatation que nous venons de faire prouve du moins que ce gaz *n'est pas stable.* Sa destruction spontanée explique d'ailleurs l'existence d'une limite supérieure d'activité après un séjour prolongé sur le radium ; cette limite correspond à la période d'équilibre stable où la rapidité de destruction de l'émanation, progressivement accrue avec la teneur de celle-ci, contrebalance la rapidité de l'apport d'émanation nouvelle fournie par le radium.

Il est naturel aussi que la limite s'élève avec le poids de radium employé, car la production d'émanation étant augmentée, la destruction ne deviendra égale à l'apport que pour une concentration plus grande.

Quant aux rayons Becquerel qui s'échappent de l'émanation, ils seraient précisément l'un des résultats de sa destruction, et des rayons α, en particulier, sont libérés à tous les stades de l'évolution.

Il n'est pas très difficile, avec toutes ces données, d'expliquer la supériorité déjà signalée des solutions de radium sur les sels solides au point de vue du dégagement de l'émanation.

Lorsque le radium est à l'état de sel solide, l'émanation,

---

1. Curie, *Comptes Rendus*, 17 novembre 1902.

produite en quantité infinitésimale au sein de celui-ci, y reste en quelque sorte emprisonnée, et seule celle produite à la surface des grains peut apparaître extérieurement ; le fait de la destruction continue de l'émanation explique alors pourquoi l'accumulation n'augmente pas indéfiniment ; mais de ce fait même, le sel solide est siège d'un rayonnement Becquerel très intense.

Au contraire, quand le sel est dissous, l'émanation se diffuse par dissolution à mesure de sa formation et peut s'échapper dans l'atmosphère, exactement comme le ferait un gaz dissous dans un liquide contenu dans une enceinte non saturée de ce gaz. Il est naturel alors que la solution apparaisse comme moins active que le sel solide, parce que la diffusion de l'émanation *extériorise* en quelque sorte le rayonnement. La preuve, c'est qu'une telle dissolution maintenue à l'air libre peut perdre la presque totalité de son activité, mais que si elle est alors renfermée dans un flacon bouché, elle reprend progressivement son activité[1] au fur et à mesure que l'émanation se reforme.

LE SECRET DU RADIUM

L'émanation dégage de l'hélium. — Nous arrivons au point culminant de l'histoire du radium, au fait qui va nous permettre d'entrevoir enfin la lumière à travers les irritants mystères que ce métal dégage par tous ses pores.

Nous venons de voir que l'émanation du radium se détruit spontanément au fur et à mesure de sa production.

Bien entendu, ce n'est pas d'une destruction au sens propre du mot, d'un anéantissement complet de ce *quelque chose* que constitue indubitablement l'émanation qu'il peut s'agir ici. Conformément à nos idées sur la conservation de la matière et de l'énergie, il ne peut y avoir que *transformation*.

De plus, puisque, d'après Rutherford, nous avons été conduits à reconnaître à cette émanation un caractère *matériel*, nous devons nous attendre à trouver des substances *matérielles* dans le résultat de cette transformation.

---

1. Mme Curie, *Thèse de doctoral*, p. 123.

Telle est précisément la magnifique conclusion d'une expérience dans laquelle Ramsay et Soddy ont vu s'effondrer sous leurs yeux l'objection la plus grave peut-être qu'on pouvait formuler contre la conception de l'unité de la matière [1].

Voici en quoi consiste cette saisissante expérience :

L'émanation d'un sel de radium très actif est recueillie pendant un temps assez long dans une ampoule placée dans l'air liquide, puis le vide est fait dans l'ampoule pour en éliminer les gaz non condensés, azote et oxygène ; son contenu, illuminé par l'effluve électrique, est examiné ensuite au spectroscope. Les trois raies du spectre de l'émanation y apparaissent d'abord, mais progressivement, *le spectre de l'*HÉLIUM *se dessine*, s'accentue, et, après quelques jours, devient très intense !

Ainsi, une transformation incomparablement plus profonde que toutes celles que nous savions produire s'effectue sous nos yeux. Pour la première fois depuis les origines de l'analyse spectrale, il nous est donné de voir le spectre d'une substance se modifier complètement, alors que ni les actions chimiques, ni les agents physiques les plus puissants ne sont capables d'apporter au spectre des corps réputés simples la plus légère altération !

C'est qu'un spectre donné est caractéristique d'un atome donné ; c'est que tous les moyens à notre disposition jusqu'à ce jour étaient parfaitement incapables d'agir, pour la modifier, sur l'architecture de l'atome, ce qui nous avait donné à penser que cet atome était intangible et qu'il devait y avoir en conséquence autant de matières diverses que d'atomes différents...

Conception désormais surannée, puisque la transformation du spectre de l'émanation en spectre de l'hélium vient démontrer que l'atome est au contraire *transformable*, que ses transformations peuvent modifier profondément ses propriétés — l'hélium ne ressemblant en rien à l'émanation, — et que vraisemblablement dès lors les atomes des divers corps simples ne diffèrent que par leur constitution interne, et non par la nature de la matière qui les constitue.

Commencée avec la stupéfaction d'apercevoir dans les rayons

---

1. Ramsay et Soddy, *Nature*, 3 août 1903.

cathodiques des particules bien plus petites que l'atome, continuée avec la surprise de découvrir dans les rayons du radium, non seulement ces mêmes particules très petites, mais encore des corpuscules comparables à l'atome d'hydrogène, quoique lancés par un corps à atomes très lourds, notre évolution vers l'idée de la complexité de l'atome et de l'unité de la matière se complète donc de lumineuse façon par la constatation de Ramsay et Soddy.

Certes, c'est là un service incomparable dont la science est redevable à la merveilleuse découverte de M. et Mme Curie; et pourtant, si nous pouvions nous élever jusqu'en des régions dont l'aridité nous interdit décidément l'accès, nous y verrions le radium, non content de sa tâche, fournir un argument puissant aux audacieux dont la foi en la simplicité de l'Univers, encore inassouvie, ne voit en notre matière unique elle-même que de l'éther en mouvement !

L'énergie du radium. — Mais il est temps de nous rappeler maintenant que le radium lui-même, par son existence seule, par sa façon de prodiguer au dehors une mystérieuse énergie, pose une troublante question que nous ne pourrions éluder sans laisser le champ libre aux fallacieux protagonistes du mouvement perpétuel.

Heureusement, résultat d'une transformation atomique que nous ne pouvons révoquer en doute, puisqu'elle s'accomplit sous nos yeux, l'hélium permet désormais à cette question une facile réponse.

Puisqu'en effet tous nos moyens d'action échouent quand il s'agit d'effectuer de semblables modifications dans la structure de l'atome, puisque pourtant ces modifications sont possibles, c'est qu'évidemment elles réclament ou mettent en jeu pour s'effectuer des quantités d'énergie *infiniment supérieures* à tout ce que nous pouvons faire agir ; c'est qu'au lieu de voir dans l'atome la particule de matière inerte de nos anciennes croyances, il nous faut désormais admettre que l'énergie joue dans sa constitution un rôle *incomparablement plus important* que dans les relations entre atomes, qui constituent l'unique domaine de notre actuelle chimie. Seuls dans l'ordre des faits

à notre discrétion, les rayons cathodiques nous permettent depuis peu de réaliser dans une certaine mesure la désintégration de l'atome ; mais cet exemple n'est pas pour infirmer la nécessité d'énormes efforts dans les travaux *intra-atomiques*, puisque toute l'énergie dépensée dans l'alimentation du tube de Crookes est employée à l'arrachement de quantités de ma-

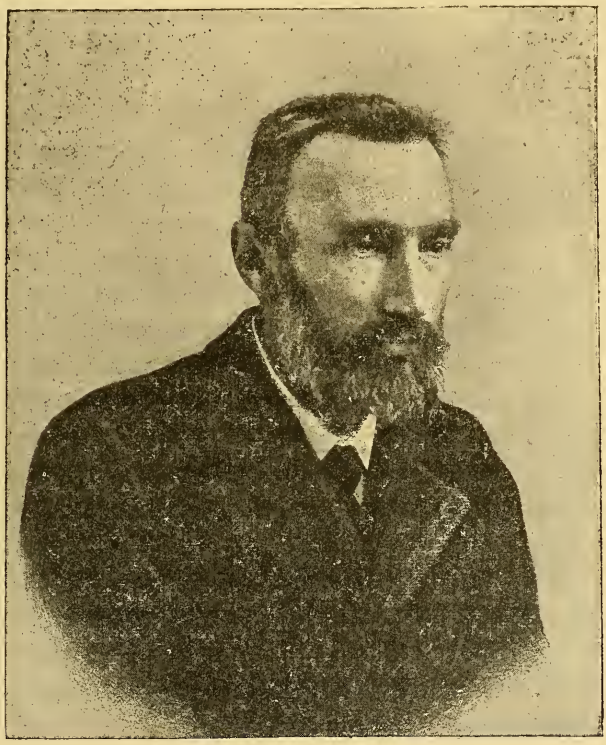


Fig. 232. — M. Curie.

tités si infimes, qu'un fonctionnement de plusieurs années est impuissant à apporter dans l'état de la cathode ou des gaz de l'ampoule la plus petite modification.

Ainsi donc, pour démolir un atome *normal*, un atome stable, de manière à en faire des atomes plus simples ou même à en libérer la matière originelle, il faut de l'énergie, de même que pour démolir une combinaison chimique ; mais il en faut *incomparablement plus*. Réduits à nos faibles moyens actuels,

nous serions vraisemblablement dans l'impossibilité de nous livrer à de semblables démolitions.

Mais nous pouvons concevoir des atomes *instables*, et dans de tels atomes, des modifications se produiront d'*elles-mêmes*, pour aboutir à des systèmes plus stables. De telles modifications ne seront naturellement possibles que *si elles dégagent de l'énergie*, car, si elles en coûtaient, elles ne seraient pas spontanées ; et elles en dégageront alors selon toutes probabilités des quantités dont nos combinaisons chimiques les plus puissantes — qui n'intéressent que la surface des atomes et non leur profondeur — ne peuvent nous donner aucune idée.

Alors, loin d'avoir à jouer un rôle au-dessus de nos forces, nous n'aurons plus qu'à être spectateurs et à marquer les points.

Or ces atomes instables ne sont pas chimériques ; ils ont été créés pour notre édification par la bonne nature : ce sont les atomes du radium, des corps radio-actifs !

C'est une transformation de l'atome du radium qui produit le dégagement énorme d'énergie corrélatif au triple rayonnement α, β, γ ; transformation à évolution très lente, puisqu'elle persiste des années sans modification appréciable du radium, et qui d'ailleurs n'aboutit pas à un terme stable, mais à l'émanation, transformable à son tour, mais bien plus rapidement : ici encore, la transformation s'accompagne d'un dégagement d'énergie énorme, puisque la formation d'une quantité tout à fait impondérable d'hélium — un des termes stables de l'évolution cette fois — est accompagnée pendant plusieurs jours d'un rayonnement intense.

Ainsi donc, nos craintes étaient vaines.

Après le rude assaut que devait leur livrer le radium, les principes essentiels de notre science sont toujours debout ; l'énergie dont il fait montre n'est qu'une partie de celle dont ses atomes, comme ceux de toute matière sans doute, sont les dépositaires.

Mais quelle leçon pourtant, quel rappel à la modestie pour nos savants, enclins trop souvent à se laisser aller à d'orgueilleuses pensées ! Leur science s'imaginait capable de sup-

puter les réserves d'énergie de l'univers, d'assigner d'après cela des limites à la vie des systèmes célestes, de fixer aux destinées de l'humanité un terme irrévocable, et voici que soudain, de par cette énergie intra-atomique dont nous ne soupçonnions guère l'énormité, il nous faut majorer de quatre ou cinq zéros le chiffre de leurs évaluations !

Et maintenant, que de surprises nous attendent dans ce monde si nouveau de la démolition et de la reconstitution des atomes !

Car il ne nous est plus interdit d'espérer maints succès dans ce domaine incomparable, dont l'accès nous était défendu jusqu'ici par l'insuffisance de nos moyens. Née d'une transformation atomique en effet, et douée sans doute en conséquence de la puissance nécessaire pour en provoquer d'autres, l'énergie du radium, dès à présent à notre discrétion, sera sans doute pour nous le levier qui forcera l'entrée de ce domaine. Déjà si féconde dans les étroites limites où elle se meut, à quoi ne pourra prétendre la chimie quand elle verra s'ouvrir tout grand le champ immense de la transmutation, celui de l'alchimie de nos ancêtres, mais rénové, mais agrandi encore et susceptible de toutes les surprises par l'intervention constante de l'électricité !

Origine du radium. — Ainsi, c'est la transformation des atomes du radium qui produit l'émanation. Mais si lente que soit cette transformation, il nous faut cependant admettre qu'elle doit avoir un terme, qu'elle doit être complète au bout d'un temps donné ; nous avons déjà essayé d'évaluer ce temps (p. 449), et nous l'avons trouvé de l'ordre des dizaines de milliers d'années ; Ramsay, en se basant d'après l'aspect des raies du spectre sur la vitesse de production de l'hélium, l'a estimé de son côté à l'ordre des milliers d'années : c'est peu, dans un cas comme dans l'autre, devant l'immense durée des périodes géologiques. Comment peut-il encore, à l'heure actuelle, subsister la plus petite parcelle de radium alors que la formation des minerais dont il provient remonte, sans aucun doute, fort loin dans le passé ?

Cette question serait assurément fort embarrassante si des faits déjà connus ne permettaient d'y faire une réponse fort simple.

Nous savons dès maintenant que l'évolution des atomes instables affecte, suivant les cas, des allures fort diverses : la transformation du radium en émanation, par exemple, est des centaines de mille fois plus lente que celle de l'émanation qui ne demande que quelques jours ; de son côté, l'émanation du thorium se détruit 5.000 fois plus vite que celle du radium, et l'émanation de l'actinium, plus fugitive encore, limite son existence à quelques secondes.

Il est dès lors très rationnel d'admettre que le radium n'est pas le chef de file de nos transformations, qu'il est lui-même le résultat d'une autre évolution, beaucoup plus lente encore que celle qui donne naissance à son émanation.

Cette hypothèse acquiert un haut degré de probabilité quand on observe que le radium accompagne constamment dans leurs minerais l'uranium et quelques métaux analogues. Ces corps paraissent donc indispensables à son existence, et ils le seraient en effet à un très haut degré si le radium procédait d'eux par filiation directe. Ainsi, le radium dériverait de l'uranium, ou d'un autre de ces métaux, au même titre que l'émanation est dérivée de lui ; comme pour celle-ci, la teneur du radium dans son minerai resterait réglée, à supposer que l'équilibre ait eu le temps de s'établir depuis la formation du minerai, au taux permanent correspondant à l'égalité entre la rapidité de la formation du radium, liée à la proportion du corps générateur, et la rapidité de sa destruction.

Le radium dans la nature. — Si la théorie que nous venons d'exposer relativement à la formation du radium est exacte, il nous faut désormais renoncer à l'espoir de découvrir un jour des minerais de radium sensiblement plus riches que la pechblende, puisque ce minéral, pour 86 pour 100 de son poids, est constitué par de l'oxyde d'uranium.

En revanche, un singulier résultat des recherches actuelles a été de révéler l'extrême diffusion du radium dans la nature. Sans parler de la récente affirmation d'un savant russe, d'après

laquelle les pétroles du Caucase renfermeraient du radium en proportion exploitable, l'air atmosphérique et plus spécialement l'air des cavernes, celui qu'on extrait du sol, est toujours plus ou moins conducteur de l'électricité ; cette circonstance peut être, presque à coup sûr, attribuée à la présence d une trace d'émanation de radium, car la propriété conductrice diminue avec le temps, et précisément de moitié en quatre jours, ce qui est la caractéristique, nous le savons, de l'émanation du radium (v. p. 455).

L'eau de certaines sources minérales renferme, elle aussi, des traces fort notables de radium : peut-être faut-il voir dans ce fait l'explication de la vertu de ces sources, restée mystérieuse jusqu'ici aux yeux des chimistes.

En outre, des recherches récentes de Dewar viennent d'apporter une nouvelle confirmation de l'extrême diffusion du radium à la surface du globe : utilisant le fait qu'aux basses températures le charbon n'absorbe l'hélium qu'en proportion bien plus faible que les autres gaz, le savant anglais a annoncé la présence permanente de ce produit de transformation du radium dans l'atmosphère et dans les eaux.

Qui sait, devant de telles constatations, si après avoir considéré le radium comme le symbole même de la rareté, nous n'en viendrons pas à nous apercevoir un jour que, doué de si merveilleuses propriétés, il joue dans notre vie un rôle intime et prépondérant, qu'il est le dispensateur ou le metteur en scène de beaucoup de phénomènes importants de notre globe !

Un pas a déjà été fait dans cette voie. L'émanation du radium, nous venons de le voir, est toujours présente dans l'atmosphère à plus ou moins haute dose : nous connaissons aux centres électrisés qu'elle libère, la propriété de faciliter la condensation de l'humidité : ainsi, le phénomène de la pluie serait en quelque sorte déclanché par le radium dès que l'humidité atmosphérique atteindrait une teneur suffisante. Mais si, au moment du déclanchement, l'humidité n'était pas suffisante pour transformer en autant de gouttelettes tous les corpuscules présents dans l'atmosphère, on sait très bien, pour l'avoir constaté *de visu*, qu'elle s'attache tout d'abord aux

particules *négatives :* que le brouillard ainsi formé vienne à tomber et l'atmosphère restera électrisée positivement : le radium — et sans doute aussi les rayons solaires ultra-violets, qui peuvent également ioniser les hautes régions de l'atmosphère — serait ainsi la cause de l'électricité atmosphérique.

Certes, il ne s'agit encore ici que d'idées assez vagues et non pas de certitudes ; mais les expériences entreprises à ce sujet montrent comme parfaitement possible une telle interprétation : on voit de quelle lumière celle-ci pourrait éclairer, si elle venait à se confirmer définitivement, la science encore plutôt vague des météorologistes !

Ultimes constatations. — Nous ne suivrons pas plus loin les savants dans l'audacieuse escalade qu'armés du radium ils continuent en ce moment vers la conquête de l'infiniment petit. Les routes sont déjà bien pénibles qu'il nous a fallu suivre pour parvenir jusqu'ici ; elles vont devenir pour nous tout à fait ardues, tout à fait impraticables, et c'est grand dommage, car pour les privilégiés qui peuvent y atteindre, quels merveilleux horizons se déroulent de ces sommets sur le monde des atomes !

C'est la constitution de ceux-ci par des centres électrisés en mouvement, indépendamment de toute matière, prise en quelque sorte sur le fait par l'anormal accroissement d'énergie des corpuscules les plus rapides du radium (v. p. 403, note).

C'est le phénomène de Zeeman apportant à l'appui de cette constitution une saisissante confirmation et permettant d'identifier qualitativement et quantitativement ces centres chargés intérieurs à l'atome avec les corpuscules rapides du radium et de l'ampoule de Crookes.

C'est, dès lors, la conception de l'atome comme un système solaire en petit dont les planètes seraient ces centres électrisés positivement et négativement, fournissant par compensation un ensemble électriquement neutre. Conception grandiose, enfermant dans la même et sublime formule l'infiniment grand et l'infiniment petit ! Conception qui permet, en outre, d'éclaircir le mystère du passage à travers la matière de corpuscules

lancés à une énorme vitesse, puisque chaque atome, supposé agrandi à l'échelle d'une cathédrale, serait constitué par la rapide rotation de quelques milliers d'astéroïdes de la grosseur d'un pois!

J'arrêterai ici cette ébauche imparfaite.

Puisse-t-elle engager mes lecteurs à se faire une idée moins superficielle de l'œuvre immense où tient une si grande place le savant modeste et bon dont je tiens à me dire l'élève le plus dévoué et le plus respectueux.

TABLE DES MATIÈRES

L'ÉLECTRICITÉ A LA PORTÉE DE TOUT LE MONDE

Pages.

Notre but 5

Courant continu 7

Chapitre premier : Premières constatations 7
Piles électriques, différence de potentiel 12
Courant électrique 17
Sens du courant électrique 17

Chapitre deuxième : La mesure dans les phénomènes électriques 21

Chapitre troisième : Considérations sur les piles usuelles 30
Dépolarisation 30
Piles à deux liquides 33
Amalgamation du zinc 34
Piles pratiques : Daniell, Bunsen, Radiguet, Leclanché 36

Chapitre quatrième : Résistance électrique 40
Influence des dimensions des conducteurs 40
Influence de la nature des conducteurs 42
Loi de Ohm 44
Multiples et sous-multiples, système C. G. S 49

Chapitre cinquième : Puissance 53
Puissance et énergie fournies par une source d'électricité 57
Puissance et énergie absorbées par un circuit 58
Circuit électrique 60
Résistance intérieure 63
Puissance utile, puissance perdue 67
Rendement d'une source d'électricité 71

Chapitre sixième : Lutte contre la résistance intérieure 75
Suppression du vase poreux 75
Piles de Méritens 76
Piles à écoulement 78
Conditions d'une bonne pile 79
Piles Mauduit, Fiorina, Devaux 81

Chapitre septième : Couplage des piles et des résistances 87
Choix du couplage 91

Pages.
Influence de la tension sur les propriétés de l'énergie électrique... 98
Couplage des résistances..... 100

Chapitre huitième: Principe des instruments de mesure..... 104
Ampèremètres et voltmètres..... 104
Action des bobines de fil sur l'aiguille aimantée..... 104
Ampèremètres..... 107
Voltmètres..... 108

Chapitre neuvième : Eclairage par incandescence..... 113
Lampes à incandescence ordinaires..... 114
Production du vide par l'air liquide..... 115
Rendement des lampes à incandescence..... 116
Un conseil en passant..... 116
Lampe Nernst ; lampe à osmium d'Auer..... 117
Calcul d'un éclairage par piles..... 120
Choix et calcul d'une batterie d'éclairage domestique..... 120
Mode de couplage..... 121
Etablissement de la batterie..... 121
Canalisation..... 122
Prix de l'éclairage par piles..... 124

Chapitre dixième : Electrochimie..... 125
Réversibilité des actions chimiques et électriques..... 125
Condition nécessaire pour que l'électrolyse se produise..... 127
Lois de l'électrolyse..... 129
Evaluation du travail chimique de l'électrolyse..... 129
Loi de Faraday..... 131
Electrolyse à anode soluble..... 134

Chapitre onzième: Applications de l'électrochimie..... 137
Accumulateurs électriques. Leur raison d'être..... 137
Principe des accumulateurs..... 139
La découverte de Planté..... 139
Accumulateurs Planté..... 140
Accumulateurs Faure..... 142
Défauts des accumulateurs actuels..... 144
Emplois des accumulateurs..... 145
Galvanoplastie : dépôts électrochimiques..... 146
Dorure, argenture, nickelage..... 148
Raffinage électrique des métaux..... 150
Préparation des produits chimiques..... 151

Electro-magnétisme..... 153

Chapitre douzième : L'induction magnétique..... 153
Relations entre l'électricité et le magnétisme..... 153
Courants induits par les aimants ; champ magnétique..... 155
Colladon contre Faraday..... 155
Champ magnétique, lignes de force..... 158
Fantômes magnétiques ; le circuit magnétique..... 158
Champ magnétique produit par les courants..... 160
Déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique..... 161
Règle des trois doigts..... 164

Pages.

Chapitre treizième : Applications des électro-aimants 186
Règle du tire-bouchon de Maxwell 169
Sonneries électriques, combinaisons diverses 170
Principe du télégraphe électrique 173
Télégraphe Morse 173
Principe du téléphone 175
Bureaux centraux 177
Le télégraphone 178
Lampes à arc 179
Arc ordinaire ; arc à flamme 179
Régulateurs en série ; lampe Cance 181
Régulateurs en dérivation ; lampe Brianne 183

Chapitre quatorzième : Principe des machines à courant continu 185
Anneau Gramme 185
Déplacement d'une spire conductrice dans un champ magnétique .. 185
Déplacement d'un anneau de spires conductrices 188
Collection du courant 190
Courants de Foucault. Comment ils prennent naissance : leur atténuation 192
Hystérésis ; sa cause ; son atténuation 194
Collecteur ; calage des balais 197
Production du champ inducteur ; excitation séparée 199
Auto-excitation 200
Modes d'excitation des dynamos 202
Excitation en série ou en dérivation 202
Réglage de l'excitation ; excitation compound 204

Chapitre quinzième : Examen de quelques types de machines à courant continu 208
Machine magnéto de Gramme 208
Utilisation de l'énergie humaine 209
Groupes d'éclairage domestique 210
Machine Gramme, type supérieur 210
Dynamo à pôles conséquents de Bréguet 211
Machines multipolaires 211
Induits en tambour 213

Chapitre seizième : Moteurs à courant continu 216
Réversibilité des formes électrique et mécanique de l'énergie 216
Déplacement dans un champ d'un conducteur traversé par un courant 217
Déplacement d'une spire dans un champ 220
Déplacement dans un champ d'un anneau Gramme traversé par un courant 222
Étude du mouvement d'un moteur électrique 224
Moteurs en série 228
Moteurs en dérivation 230

Chapitre dix-septième : Applications des moteurs 234
Transmission d'énergie dans les usines 234
Supériorité de l'électricité pour la transmission de l'énergie 234
Utilisation mécanique de l'énergie des réseaux d'éclairage 235

Pages.
Le moteur électrique dans la petite industrie..... 235
Traction électrique..... 236
Transmission de l'énergie à distance. Utilisation de la « houille blanche »..... 241
Labourage électrique ; ses qualités de rapidité et d'économie..... 243
Compteurs électriques. Tarification à forfait ou au compteur..... 245
Compteurs O'Keenan, Thomson..... 246

Courants variables.....

Chapitre dix-huitième : Self-induction..... 250

Chapitre dix-neuvième : Applications de la self-induction..... 260
Rôle protecteur de la self-induction : disjoncteurs..... 260
Allumoirs..... 261
Parafoudres..... 262

Chapitre vingtième : Induction mutuelle..... 264
Nécessité du fer dans les bobines d'induction mutuelle..... 270
Transformateurs..... 270

Chapitre vingt et unième : Bobine de Ruhmkorff..... 273
Interrupteur à trembleur..... 274
Interrupteur Gaiffe..... 277
Interrupteur Wehnelt..... 277

Chapitre vingt-deuxième : Une nouvelle grandeur électrique : la capacité..... 281
Bouteille de Leyde ; charge et décharge des condensateurs..... 281
Condensateurs industriels..... 283
Représentation hydraulique de la capacité..... 285
Véritable rôle des isolants..... 285
Oscillations électriques ; leur mécanisme..... 290

Chapitre vingt-troisième : Haute fréquence..... 296
Dispositifs de Tesla, d'Arsonval..... 296
Effets de la haute fréquence : action physiologique ; applications médicales..... 298
Effets d'induction..... 300
Meuble Gaiffe..... 303

Courants alternatifs..... 304

Chapitre vingt-quatrième : Courants alternatifs simples ; représentation hydraulique..... 304
F. é. m. alternative sur résistance sans self..... 307
Mesure des courants alternatifs..... 309
Diff. de pot. efficace..... 310
Courant efficace..... 311
F. é. m. alternative sur self-induction..... 311
Puissance apparente, puissance réelle..... 315
F. é. m. alternative sur capacité..... 320
F. é. m. alternative sur self et capacité en série..... 324
Résonance..... 326
F. é. m. alternative sur self et capacité en dérivation..... 329

Pages.
Chapitre vingt-cinquième : Alternateurs et transformateurs 332
Courants polyphasés et champs tournants..... 340
Production des courants polyphasés..... 340
Production des champs tournants..... 341
Moteurs à champ tournant..... 342

Chapitre vingt-sixième : Transmission de la pensée..... 345
Télégraphie multiple..... 345
Télégraphie et téléphonie simultanées..... 348
Téléphonie multiple..... 350
Transmission de l'écriture. Télautographe..... 352
Transmission des images par l'électricité..... 356

CAUSERIES SUR LE RADIUM

ET SUR

LES NOUVELLES RADIATIONS

Comment j'ai entrepris une tâche difficile..... 361

Chapitre premier : **Ondulations hertziennes**..... 363
Quelques pages sur la théorie des ondulations. Ondulations, ou émission ?..... 363
Mécanisme des propagations ondulatoires..... 365
Rapidité des vibrations lumineuses..... 368
Ce que sont les interférences et à quoi elles nous servent..... 370
Influence de la longueur d'onde sur la couleur de la lumière..... 373
Exploration du spectre solaire. Spectre chimique ; l'ultra-violet.... 374
Spectre infra-rouge..... 376
La découverte de Hertz..... 377
Il n'y a pas d'isolants pour l'électricité..... 377
Production des ondes hertziennes..... 380
Mesure de la longueur d'onde et de la vitesse de propagation des ondulations électriques..... 384
Télégraphie sans fils..... 387
Tube de Branly..... 388

Chapitre deuxième : **Rayons cathodiques et rayons X.** La découverte de Rontgen..... 391
Du tube de Geissler à l'ampoule de Crookes. Tubes de Cooper-Hewitt. 393
Rayons cathodiques ; leurs propriétés..... 397
Bombardement moléculaire..... 399
Électrisation des particules cathodiques. Mesure de leur vitesse..... 400
Un projectile dangereux..... 403
Masse des corpuscules cathodiques..... 404

Pages.
Corpuscules positifs. Hypothèse de Crookes sur la genèse des rayons cathodiques 408
Observation des rayons cathodiques dans l'air 408
Rayons de Routgen. Comment un expérimentateur heureux fait une grande découverte 409
Comment se forment les rayons X 412
Propriétés et applications des rayons X 412
Radiographie 412
Perfectionnements dans la technique des rayons X 414
Action physiologique des rayons X. Radiothérapie 415
Que sont les rayons X ? 416

Chapitre troisième : **Le radium** 419
Comment le radium a été découvert 419
L'hypothèse de M. Poincaré et la découverte de M. Becquerel 419
Spontanéité de l'émission uranique 421
Caractères du rayonnement uranique 422
Les travaux de Mme Curie 423
La méthode de mesure. Premier succès : le thorium 424
L'anomalie de la pechblende 426
Un problème difficile : l'extraction du radium 426
La recherche de minerais nouveaux 429
Le polonium, l'actinium, le radium. Individualité chimique de ce dernier 431
Propriétés du radium. Premières surprises : excitation de la florescence ; actions chimiques 434
Applications à la radiographie ; actions électriques 435
Actions physiologiques ; applications médicales 435
Déviabilité magnétique des rayons du radium 437
Complexité du rayonnement 438
Déviabilité électrique des rayons du radium 439
Vitesse, charges et masses des corpuscules du radium 440
Spinthariscope de Crookes 442
Propriétés des diverses espèces de rayons 443
Imperfection des radiographies au radium 444
Électrisation spontanée des sels de radium 446
Dégagement spontané de chaleur 447
La radio-activité induite 449
Propagation de la radio-activité. Émanation du radium 449
Condensation de l'émanation. Hypothèse sur sa provenance 452
Instabilité de l'émanation 454

Le secret du radium 456

L'émanation dégage de l'hélium 456
L'énergie du radium 458
Origine du radium 461
Le radium dans la nature 462
Ultimes constatations 464

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

L'ÉLECTRICITÉ A LA PORTÉE DE TOUT LE MONDE

Pages.

Accumulateurs 137
— (Principe des). 139
— types Planté, Faure..... 141
Accumulateurs actuels. Leurs défauts. Leur avenir possible 144
Accumulateurs (Emplois des) 145
Aimantation du fer par le courant..... 154
Aimants droits et en fer à cheval 169
Allumoirs à incandescence et à self-induction..... 261
Alternateurs..... 332
Aluminium (préparation électrolytique)..... 152
Amalgamation des zincs..... 34
Ampère (Bonhomme d')..... 104
Ampère (unité d'intensité de courant)..... 27
Ampèremètres et voltmètres. 107
Anneau Gramme, théorie..... 185
Anode..... 135
Arc à flamme (Blondel, Bremer)..... 179
Argenture..... 148
Arsonval (d'). Dispositif de production de la haute fréquence 296
Auto-excitation des dynamos. 200

Bobines. Explication de leur rôle en électricité... 106, 163
Bobine de Ruhmkorff..... 273
Bonhomme d'Ampère..... 104
Bouteille de Leyde..... 281

Canalisation électrique (Etablissement d'une)..... 121

Pages.

Capacité..... 281
— Sa représentation hydraulique..... 285

Capacité inductive spécifique. 290
— sur force électromotrice alternative..... 320
Capacité et self-induction sur force électromotrice alternative..... 324
Calcium (Fabrication du)..... 152
Carborundum (Fabrication du) 125
Carbure de calcium (Fabrication au four électrique du). 152
Cathode..... 135
C. G. S. (Système)..... 48
— Multiples et sous-multiples..... 48
Champ magnétique..... 158
— — des aimants 158
— — des circuits 160
— (Production du — inducteur dans les dynamos). 199
Champ d'un fil, d'une spire, d'une bobine..... 160
Champ tournant..... 340
Chlorate de potasse. Préparation électrolytique..... 152
Chlore. Préparation électrolytique..... 151
Circuit électrique (Le)..... 60
Circuit magnétique (Le)..... 158
Collecteur (des dynamos). 190, 197
Compound (excitation)..... 191
Compteurs (O'Keenan, Thomson)..... 245

Pages.
Coulomb (unité de quantité). 26
Couplage des sources d'électricité..... 87
Couplage des sources d'électricité (choix du)..... 91
Couplage des résistances..... 100
Courant continu, représentation hydraulique..... 12
Courant (Unité de)..... 27
— — Sa mesure. 27, 107
Courants induits par les aimants..... 131
Courants de Foucault..... 192
— de déplacement.... 288
— alternatifs..... 340
Courant alternatif efficace.... 311
— — polyphasé. 340
Cuivrage galvanique..... 147

Décalage..... 314
— en avant de la capacité 323
— en avant de la self-induction..... 315
Décalage des balais..... 197, 224
Dépolarisation..... 30
Dépôts électrochimiques..... 147
Dérivation (Montage des sources en)..... 90
— (Montage des résistances en)..... 100
— (Excitation des dynamos en)..... 202
— (Excitation des moteurs en)..... 230
Diamant (Fabrication au four électrique)..... 152
Différence de phases..... 315
Différence de potentiel..... 13
— Représentation hydraulique..... 13
Diff. de pot. (Unité de)..... 22
— aux bornes avec le débit (Baisse de la)..... 23, 64
Disjoncteurs..... 260
Dorure..... 148
Dynamos (Principe des).. 157, 185
— Théorie de l'anneau Gramme..... 185
— Collection du courant..... 197
— Modes d'excitation.. 199
— Examen de quelques types..... 201

Pages.
Dynamos multipolaires..... 213
— à induits en tambour 218

Eclairage électrique par piles (Calcul d'une installation d')..... 120
— Combinaisons diverses..... 123
— Lampes à arc..... 179
— Lampes à incandescence..... 113
— (Economies d')..... 116
— Groupes d'éclairage domestique..... 210
Electrochimie..... 122
— Table des équivalents électrochimiques..... 133
Electrochimie, applications.. 137
Electrolyse..... 125
— Conditions pour qu'elle se produise..... 127
Electrolyse (Lois de l')..... 129
— à anode soluble.. 134
Electromagnétisme..... 153
Electron..... 133, 407, 441
Enroulements en anneau.... 188
— tambour... 213
Equivalent électrochimique.. 133
Excitation des dynamos (shunt, série, compound)..... 202
Excitation des moteurs..... 228
Excitation séparée des dynamos..... 199

Facteur de puissance..... 319
Fantômes magnétiques..... 158
Farad (unité de capacité)..... 289
Faraday (Loi de)..... 131
— découvre l'induction 155
Flux de force..... 165
Force électromotrice. Définition..... 23
F. é. m. Représentation hydraulique..... 63
F. é. m. (Unité de)..... 23
— de polarisation..... 127
— — (Table de quelques)..... 128
F. é. m. d'induction..... 162
— alternative..... 305
Force magnétomotrice..... 159
Four électrique..... 152
Fréquence (Haute)..... 296

Pages.

Galvanoplastie (dépôts, dorure, argenture, etc.)..... 147
Galvanomètres (Principe des). 105

Haute fréquence..... 296
— — Dispositifs de d'Arsonval, de Tesla..... 296
Haute fréquence (Effets de la). 298
Henry (Unité de self-induction) 258
Hystérésis..... 194

Images (Transmission des) par l'électricité..... 356
Induction magnétique..... 155
— (Self-)..... 250
— mutuelle..... 264
Induits de dynamos en anneau 189
— — tambour 113
Installation d'éclairage par piles (Calcul d'une)..... 120
Intensité de courant. Définition, comparaison hydraulique..... 12
Intensité de courant (Unité d'). 27
— — efficace.. 311
Interrupteurs de bobines Ruhmkorff : Foucault, Gaiffe, Wehnelt..... 276
Ions..... 133, 400, 405
Isolants (Véritable rôle des) 285, 377

Joule ou watt-seconde (unité de travail électrique)..... 57

Labourage électrique..... 243
Lagrange et Hoho (Procédé).. 279
Lampes à incandescence..... 113
Lampes Nernst..... 117
— — type Express.. 118
— à arc..... 179
— — en série (Cance) 181
— — en dérivation (Brianne)..... 183
Lignes de force..... 158
Loi de Ohm..... 44
Lois de l'électrolyse..... 129
— Lenz..... 189
— la self-induction..... 266
— l'induction mutuelle.. 267

Magnésium..... 152
Magnétisme (Liens entre l'électricité et le)..... 153

Pages.

Magnétisme rémanent.. 194, 201
Magnéto-électriques (Machines) 199
Maxwell (Règle du tire-bouchon de)..... 169
Mesure des courants continus 105
— — alternatifs..... 309, 319
Modes d'excitation des dynamos..... 202
Moteurs électriques (théorie). 216
— — en série. 228
— — en dérivation..... 230
Moteurs électriques à courants polyphasés..... 342
Moteurs électriques, applications..... 234
Multiples et sous-multiples C. G. S..... 48
Multipolaires (Dynamos)..... 211

Nickelage..... 148
Nitrique (fabrication de l'acide) 152

Ohm (Loi de)..... 44
— (Exceptions à la loi de) 253
Ohm (unité de résistance).... 44
Ohm-centimètre..... 47
Oscillations électriques..... 290
Ozone (Fabrication de l')..... 152

Parafoudres..... 262
Période..... 307
Perméabilité magnétique.... 160
Piles (définition)..... 21
— usuelles (Considérations sur les)..... 30
Piles (dépolarisation)..... 30
— à un liquide et dépolarisant..... 31
Piles à deux liquides..... 32
— Influence de la nature des électrodes..... 33
Piles, amalgamation des zincs. 34
— pratiques (Daniell, Bunsen, etc.)..... 36
Piles sans vase poreux de Méritens. Avantages du dépolarisant..... 76
Piles à écoulement..... 78
— (Eclairage par)..... 111
Polarisation..... 31
Polyphasés (Courants)..... 340

Pages.
Produits chimiques (Préparation électrique des)..... 151
Puissance. Définition, comparaison hydraulique..... 53
Puissance (Unité de)..... 56
— utile, puissance perdue..... 67
Puissance apparente et réelle. 315

Quantité d'électricité. Définition, comparaison hydraulique..... 26
Quantité (Montage des sources d'électricité en)..... 90

Raffinage électrolytique..... 150
Règle du tire-bouchon de Maxwell..... 169
Règle des trois doigts (cas des dynamos)..... 164
Règle des trois doigts (cas des moteurs)..... 220
Rendement des sources d'électricité..... 71
Rendement des moteurs..... 226
— lumineux des lampes à incandescence..... 116
— lumineux des lampes à arc..... 181
Résistance. Définition, représentation hydraulique..... 40
Résistance (Unité de)..... 44
— Sa mesure industrielle..... 111
Résistance spécifique..... 46
— — (Table.. des) de divers corps..... 47
Résistance intérieure des piles 63
Résistance intérieure des piles (La lutte contre la)..... 75
Résistance (Couplage des)... 100
— réduite..... 101
— magnétique..... 159
Représentation hydraulique de la différence de potentiel.. 13
Représentation hydraulique de la force électromotrice.... 63
Représentation hydraulique de l'abaissement de la différence de potentiel aux bornes avec le débit..... 23, 64
Représentation hydraulique du courant..... 12

Pages.
Représentation hydraulique de la résistance..... 40
Représentation hydraulique de la self-induction..... 251
Représentation hydraulique de l'induction mutuelle..... 265
Représentation hydraulique de la capacité..... 285
Représentat. hydraulique des oscillations électriques..... 292
Représent. hydraulique d'une force électromotrice alternative agissant sur une self-induction..... 311
Représent. hydraulique d'une force électromotrice alternative agissant sur une capacité..... 320
Représent. hydraulique d'une force électromotrice alternative agissant sur self et capacité..... 324
Résonance..... 326
Rhéostat de démarrage (moteurs série)..... 229
Rhéostat de démarrage (moteurs shunt)..... 231
Rhéostat d'excitation des dynamos..... 205

Saturation magnétique..... 201
Self-induction. Définition, comparaison hydraulique..... 250
Self-induction (Unité de)..... 258
Self-induction. Applications.. 260
Self-induction soumise à une force électromotrice alternative..... 311
Self-induction et capacité soumises à une force électromotrice alternative..... 311
Sens du courant électrique... 17
Sens des lignes de force d'un champ..... 159
Sens du champ produit par un courant..... 169
Sens du courant produit par un champ dans un conducteur qui le coupe..... 163
Série ou tension (Montage en).. 87
— — (Excitation des dynamos en)..... 202

Pages.
Série ou tension (Excitation des moteurs en)..... 228
Shunt (Dynamos en dérivation ou en)..... 202
Shunt (Moteurs)..... 230
Sonneries électriques. Principe 170
— — à signaux variés..... 171
Soude électrolytique..... 151

Télautographe..... 352
Télégraphe Morse. Principe... 173
Télégraphie multiple..... 345
Télégraphone..... 177
Téléphonie..... 175
— multiple..... 350
Tension. Son influence sur les propriétés physiologiques de l'énergie électrique..... 98
Tension ou en série (Montage des sources d'électricité en). 88
Tension ou en série (Montage des résistances en)..... 100
Tesla (Dispositif de) pour la haute fréquence..... 296
Traction électr. des tramways. 236

Pages.
Traction électrique des chemins de fer..... 238
Traction électrique des automobiles..... 240
Transmission de l'énergie à grande distance..... 240
Transmission de l'énergie dans les usines..... 234
Transmission des images par l'électricité..... 356
Transformateurs..... 270, 337
Turbines atmosphériques.... 210

Utilisation mécanique de l'énergie des réseaux d'éclairage..... 235

Vanille (fabrication de la).... 152
Vide (production du)..... 115
Volt (Unité de différence de potentiel)..... 22
Voltamètres à cuivre..... 26
— à eau..... 126
Voltmètres et ampèremètres. 107

Watt (unité de puissance)... 57
Watt-heure..... 57

LE RADIUM ET LES NOUVELLES RADIATIONS

Actinium..... 431
— (émanation de l')..... 462
Analyse spectrale..... 432
Anode..... 397
Antenne..... 389
Anticathode..... 415
Atomes (constitution des) 407, 409, 441, 464
Atomes instables..... 460
— d'électricité. 134, 407, 441

Bombardement moléculaire.. 399

Cathode..... 397
Cohéreur..... 388
Condensation de l'humidité par les rayons cathodiques. 406, 409
Condensation de l'humidité par les rayons du radium..... 440

Constitution des atomes. 407, 409, 464
Corpuscules cathodiques..... 399
— du radium..... 438
— — (passage à travers les obstacles). 409, 443
Corpuscules β (vitesse et masse) 440
— γ (vitesse et masse) 440
Couleur de la lumière..... 373

Décharge des corps électrisés par les rayons ultra-violets. 376
Décharge des corps électrisés par les rayons cathodiques. 409
Décharge des corps électrisés par les rayons uraniques. 422, 424
Déviabilité électrique des rayons cathodiques..... 401
Déviabilité électrique des rayons du radium..... 439

Pages.
Déviabilité magnétique des rayons cathodiques..... 402
Déviabilité magnétique des rayons du radium..... 437

Electrisation des corpuscules cathodiques..... 400
Electrisation des corpuscules du radium..... 438
Electron..... 134, 407, 441
Electroscope (décharge de l').. 422
Emanation..... 451
— (condensation de l') 452
— (hypothèse sur l').. 454
— (instabilité de l')... 454
— (dégage de l'hélium) 456
Emission (théorie de l')..... 364
Ether..... 365

Fluorescence par les rayons cathodiques..... 398
Fluorescence par les rayons du radium..... 434
Fluorescence (hypothèse de Poincaré sur la)..... 419
Fréquence des ondulations lumineuses..... 368

Hauteur des sons..... 368
Hélium (l'émanation dégage de l')..... 456
Hypothèse de Crookes..... 408
— de l'émission..... 364
— des ondulations... 365

Infra-rouge..... 376
Interférences des rayons lumineux..... 370
Interférences des ondes hertziennes..... 385
Interférences des rayons X... 417
Isolants (il n'y a pas d'). 285, 377

Kanalstralhen..... 399, 408

Longueurs d'onde..... 367
— — (leur mesure) 372

Masse et charge des corpuscules cathodiques.... 404, 408
Masse et charge des corpuscules du radium..... 440

Pages.
Nœuds..... 371

Ondulations (théorie des).... 365
— hertziennes. Production..... 380
— hertziennes. Propagation..... 382
— hertziennes. Interférences ... 384
— hertziennes. Vitesse..... 385
Oscillateur de Hertz..... 380

Propagation du son..... 365
— de la lumière... 366
— des ondes hertziennes..... 382
— d'un rayon électrique..... 384
— d'un rayon lumineux..... 367
Polonium..... 431

Radiographie..... 414
— au radium..... 444
Radioscopie..... 412
Radiothérapie..... 415
Radio-activité..... 422
— (mesure de la).. 424
— induite..... 449
Radium (dans la nature)..... 462
— (dégagement de chaleur du)..... 447
— (découverte)..... 426
— (électrisation spontanée) 438
— (énergie du)..... 458
— (extraction du)..... 427
— (origine du)..... 461
— (propriétés du)..... 434
— (rayonnement du).... 437
— (recherche de minerais nouveaux).... 429
— (spectre du)..... 432
Rayons α, β, γ, propriétés 438, 441, 443
— Becquerel..... 422
— canaux..... 400, 408
— cathodiques..... 397
— — (fluorescence par les)... 398
— — (passage dans l'air)..... 408
Rayons N..... 376

Pages.
Rayons Röntgen ou X (production)..... 409
Rayons Röntgen ou X (formation)..... 412
Rayons Röntgen ou X (nature) 416
Rayons Röntgen ou X (propriétés et applications)..... 412
Rayons Rubens..... 377
Résonateur de Hertz..... 384
Röntgen (la découverte de)... 409

Spectre calorifique..... 376
— chimique..... 374
— des corps simples.... 432
— lumineux..... 374
Spinthariscope..... 442

Télégraphie sans fils..... 387
Thorium (radio-activité du)... 425
— (émanation du)..... 462

Pages.
Transformations atomiques... 458
Transmutation..... 361, 457, 461
Tubes de Branly..... 388
— Cooper-Hewitt..... 395
— Crookes..... 397
— perfectionnés pour la radiographie... 414
Tubes Geissler..... 393

Ultra-violet..... 374
Uranium..... 421

Ventres..... 372
Vitesse des corpuscules cathodiques..... 400
Vitesse des corpuscules du radium..... 440
Vitesse de la lumière..... 364
— du son..... 363

TOURS, IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES, 6 RUE GAMBETTA.

COUNTWAY LIBRARY OF MEDICINE
QC
521
C57